Agriculture Canada

Research Branch | Direction générale de la recherche

Technical Bulletin 1991-6E

Modelling methodology for estimating forage yield potential in Canada

Canada

Modelling methodology for estimating forage yield potential in Canada

A. BOOTSMA and J.B. BOISVERT
Land Resource Research Centre
Ottawa, Ontario

Technical Bulletin 1991-6E
LRRC Contribution No. 90-50

Research Branch
Agriculture Canada
1991

91-05499/

Copies of this publication are available from
Director
Land Reaource Research Centre
Research Branch, Agriculture Canada
Ottawa, Ontario
K1A 0C6

Produced by Research Program Service

© Minister of Supply and Services Canada 1991
Cat. No. A54-8/1991-6E
ISBN 0-662-18569-2

Également disponible en français sous le titre
Méthode de modélisation relative à l'estimation des potentiels de rendement des plantes fourragères au Canada

Cover illustration
The dots on the map represent Agriculture Canada research establishments.

TABLE OF CONTENTS

	Page
FOREWORD	3
SUMMARY	3
LIST OF TABLES	4
LIST OF FIGURES	5
LIST OF APPENDICES	5
1. INTRODUCTION	6
2. MODEL DEVELOPMENT	7
2.1 Selection of Model	7
2.2 Simulating Growth Periods and Cutting Schedules	8
2.2.1. Criteria for estimating date of first cut	8
2.2.2. Criteria for estimating dates of additional cuts	10
2.2.3. Validation of cutting date criteria	13
2.3 Additional Modifications to the FAO Model for Application for Forages	15
2.3.1. Workability factor	15
2.3.2. Respiration losses	15
2.3.3. Leaf area index	15
2.3.4. Start of growing season	16
2.3.5 Soil moisture budgeting	16
2.3.6. Harvest index	16
2.4 Simulation of Potential Net Dry Matter Yield	16
2.4.1. Assumptions for maximum crop growth rate	16
2.4.2. Validation of potential (constraint-free) yield	17
2.5 Simulation of Anticipated Net Dry Matter Yield	19
2.5.1. Model procedures and modifications	19
2.5.2. Validation of anticipated yield	21
a) Alfalfa & timothy yield validation	21
b) Wheatgrass yield validation	25
3. SUMMARY AND CONCLUSIONS	25
4. REFERENCES	28
5. APPENDIX	31

FOREWORD

This modelling effort came about as a result of the need for forage yield information for broad scale land evaluation studies in Canada. Forages constitute a major portion of the total agricultural production system in almost all regions of the country and no evaluation of land capability and crop suitability would be complete without its consideration. Previous work has been done to estimate crop production potentials of five annual crops grown in Canada using a crop growth model. However, a suitable model for forages was not available until now.

The modelling work was undertaken as part of a land evaluation study led by Dr. J. Dumanski in the Land Resource Research Centre. Throughout the course of this work progress was reviewed by the project team and on-going plans were formulated as required. The objective was to develop a model which would estimate forage yields for all areas of Canada using the climatic normals data available in the Land Potential Data Base, and for Agroecological Resource Areas in the prairie region using climatic normals data prepared under the Prairie Land Evaluation Project.

SUMMARY

This bulletin describes the modelling methodology that was developed to estimate average potential (constraint-free) and anticipated (rainfed) forage yields in Canada. A revised general crop growth model previously used to estimate production potentials of annual crops in Canada was selected as a basis for the forage model (FORYLD). Subroutines were developed and validated with field data to simulate normal growth periods and cutting schedules for alfalfa and for grasses (timothy, bromegrass, wheatgrass). Each growth period was then treated as a full season for annual crops in the FAO model. Several significant modifications in addition to cutting schedules were incorporated into FORYLD. These included the following: i) the manner in which leaf area index was estimated; ii) the relationship between maximum leaf photosynthesis and temperature; and iii) the proceduree used to determine the moisture stress factor for computing anticipated yields from potential yields. Comparisons of model yield estimates with yields observed in field trials at various locations across Canada were made for calibration and validation. Results indicate that the model estimates potential and anticipated yields with an accuracy of about $\pm$ 1 t/ha.

LIST OF TABLES

		Page
Table 1.	Criteria for estimating average cutting dates for alfalfa - Option 1.	11
Table 2.	Criteria for estimating average cutting dates for alfalfa - Option 2.	12
Table 3.	Criteria for estimating average cutting dates for grasses.	13
Table 4.	Correlation coefficients (r) between estimated and observed average cutting dates for alfalfa and grasses.	13
Table 5.	Comparison between estimated and observed average potential dry matter yields of alfalfa and timothy.	18
Table 6.	Relationship between available water-holding capacity and soil particle size groups.	20
Table 7.	Comparison between observed and estimated average anticipated dry matter yield (B_{ya}) for alfalfa.	22
Table 8.	Comparison between observed and estimated average anticipated dry matter yield (B_{ya}) for timothy.	23
Table 9.	Comparison between observed and estimated average anticipated dry matter yield (B_{ya}) for crested wheatgrass.	26
Table 10.	Comparison between observed and estimated average anticipated dry matter yield (B_{ya}) for intermediate wheatgrass.	26

LIST OF FIGURES

		Page
Figure 1.	Relative development rate (RDR) as a function of photoperiod or daylength (P).	9
Figure 2.	Relationship between the average mean daily air temperature and the variable DAYS used in selection of cutting date criteria for alfalfa.	10
Figure 3.	Comparison between average estimated and observed cutting dates (Calendar day) for up to four cuts of alfalfa and two cuts for grasses.	14
Figure 4.	Relationship between maximum leaf photosynthetic rate (Pm) and mean daytime temperature (T_{mdt}).	17
Figure 5.	Relationship between the moisture stress factor (MSF) and the soil moisture deficit - surplus (SMDS).	21
Figure 6.	Comparison between average estimated and observed anticipated dry matter yield for all cuts of alfalfa combined (two-three cuts).	24

LIST OF APPENDICES

Appendix 1.	Observed and estimated average cutting dates used in validation of cutting date criteria for alfalfa and grasses.	31

1. INTRODUCTION

The concept of using computer models of crop growth and yield to estimate potential crop production from information on climatic and soil resources is not new. In 1978, the Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO) published procedures for assessing the production potential of eleven crops in developing countries (FAO, 1978). The FAO procedures involved estimating constraint-free yield potentials from the temperature and radiation regimes and then evaluating anticipated yield potential under rainfed conditions by taking moisture stress and other yield-reducing factors into consideration. The procedures used to quantify the effects of water stress on yield were documented by Doorenbos and Kassam (1979). The FAO procedures were subsequently adapted for estimating the production potential of five annual crops in Canada (Dumanski and Stewart, 1983; Stewart, 1983). Estimates of crop yields and production potential were made for 755 soil areas outlined on the Soils Map of Canada (Clayton et al., 1977) using representative climatic and soil information for each map unit. Information on soils, climate and potential crop yields, either used as input for or generated by these studies, have since become part of a computerized information base called the Land Potential Data Base (Kirkwood et al., 1989).

Up to now, studies on the production potential of Canada's land resources have focused primarily on annual crops. There is a need, however, to develop procedures for evaluating production potentials of perennial forage crops since forages are a very significant part of the agricultural production systems in Canada. Such evaluations are needed for a variety of on-going activities, such as land use planning, crop management decisions, agricultural policy development, crop insurance programs, agricultural research planning and evaluation, and so forth.

The purpose of this bulletin is to describe the modelling procedures developed for estimating forage yield potentials in Canada from climatic and soils information. The basic framework of the modelling procedures has been previously documented (Stewart, 1983) and thus will only be briefly summarized. Emphasis is placed on describing the modifications made to existing methodologies for forages.

Numerous species and varieties of forages are grown in Canada. To keep the modelling effort within available resources, the work concentrated on simulating yields of several of the most common legume and grass species grown, namely alfalfa, timothy (for moist regions) and crested and intermediate wheatgrass (for the drier prairie regions). These species generally also had the most data available from field trials at a sufficient number of locations for model calibration and validation. Emphasis was placed on estimating long term yield potential only using climatic normals data and not on predicting yields on an annual basis.

Forage yields are frequently affected by factors such as persistence of the crop and overwintering damage, particularly for alfalfa. However, lack of available data and resources prevented incorporation of

these factors into the model at this stage. Consequently, efforts were concentrated towards estimating average forage yield potentials in the first few years after establishment, assuming no yield reductions due to winterkill. Considerable additional research and experimental data will be necessary if these factors are to be incorporated into the model.

2. MODEL DEVELOPMENT

2.1. Selection of Model

In developing a forage model for estimating average yield potentials in Canada, we choose to modify the existing FAO model adapted for Canadian conditions by Stewart (1983) (hereafter referred to simply as the FAO model). Reasons for this choice include the following: 1) computer software for the existing model was readily available; 2) climatic and soils information required as input to the model were also readily available from the Land Potential Data Base (Kirkwood et al., 1989); 3) other workers have had some success in adapting the FAO model for estimating annual yields of forages (McBride and Brown, 1984); 4) the model is capable of estimating both potential constraint-free yield with no moisture stress and anticipated yields under rainfed conditions.

The FAO model estimates the constraint-free net biomass production (B_N) using the equation:

$$B_N = 0.36\ b_{gm} / (1/N + 0.25\ C_t) \qquad (1)$$

where b_{gm} is the maximum rate of biomass production ($Kg.ha^{-1}.day^{-1}$) under full cover (leaf area index ≥ 5).

N is the growing season length (days).
C_t is a maintenance respiration function which is dependent on mean air temperature.

b_{gm} is determined by a method of DeWit (1965), using estimates of the maximum rate of biomass production on clear and overcast days. The seasonal mean fraction of daytime when the sky is overcast is estimated from incoming global solar radiation. b_{gm} is also dependent on the maximum rate of leaf photosynthesis which is a function of crop species and temperature. Equation (1) assumes that the cumulative potential growth follows an idealized sigmoidal growth curve under unconstrained conditions. An adjustment is made to the constraint-free net biomass production if maximum leaf area index (LAI) of the crop is < 5.0.

The potential net dry mattter yield (B_y) is determined by taking the harvest index (H_i) into account, i.e.

$$B_y = B_N \times H_i \qquad (2)$$

where H_i is the fraction of the net biomass production that is economically useful. B_y is therefore the potential yield that can be harvested under conditions where water, nutrients, weeds, pests and diseases do not limit crop growth.

Anticipated yield (B_{ya}) is the harvestable yield after reductions due to workability (harvest losses) and moisture stress are taken into consideration. This is determined in the FAO model as follows:

$$B_{ya} = B_y \times MSF \times WF \quad (3)$$

where MSF is the moisture stress factor and WF is the workability factor.

In the FAO model, the moisture stress factor is computed from the ratio of actual (AE) to potential (PE) evapotranspiration, using an empirically-derived yield response factor (K_y) taken from Doorenbos and Kassam (1979), i.e.

$$MSF = 1 - K_y (1 - AE/PE) \quad (4)$$

AE and PE are seasonal averages determined using a soil moisture budgeting procedure. The workability parameter was estimated from fall workday probabilities. Subsequent discussion will focus on the modification made to the FAO model for forages. For convenience, the modified forage model will be referred to as FORYLD.

2.2. Simulating Growth Periods and Cutting Schedules

The FAO model for Canada was designed to estimate average potential yields for annual crops for an average growing season whose length was determined by temperature. In the case of forages, several growth periods and harvests are usually possible during a growing season. Therefore, subroutines were developed to simulate average growth periods and harvest dates from climatic normals data for legumes (alfalfa) and for grasses (timothy, wheatgrass). Each growth period was then treated as a complete growing season in FORYLD.

2.2.1. Criteria for estimating date of first cut

Average dates of first cut for both legumes and grasses were estimated using accumulated photothermal units (PTU's). PTU's were defined as accumulated growing-degree days above a 5°C base (GDD) modified by a daylength factor. Previous studies have shown that accumulated GDD can be used to estimate maturity dates in specific geographic regions (Bootsma, 1984; Harcourt, 1984). However, on a Canada-wide basis, significant differences in daylength can occur which may affect the rate of development to maturity of some forage species. A review of the literature indicated that the effects of daylength on the rate of development can vary considerably among different forage species and varieties. However, for many of the most common grass and legume species (e.g. timothy, bromegrass, alfalfa, clover) longer daylengths induce earlier heading or flowering, while short daylengths delay flowering and may even inhibit it completely (Evans and Allard, 1934; Allard and Evans, 1941; Evans and Wilsie, 1946; Ludwig et al., 1953; DeRuiter and Taylor, 1979). Based on this evidence, an empirical approach was adopted for including daylength effects in FORYLD, using the concept of

a relative development rate (RDR). The relationship assumed between RDR and daylength or photoperiod (P) is shown in Fig. 1 and can be mathematically approximated by

$$RDR = -0.37+0.1626(P) - 0.005942(P^2) + 0.000062217(P^3) \quad (5)$$

Daily PTU's were computed from GDD multiplied by RDR as follows:

$$\text{Daily PTU} = (T_{MN} - 5.0) \times RDR \quad (6)$$

where T_{MN} is the 30-year normal daily mean temperature (1951-80 period).

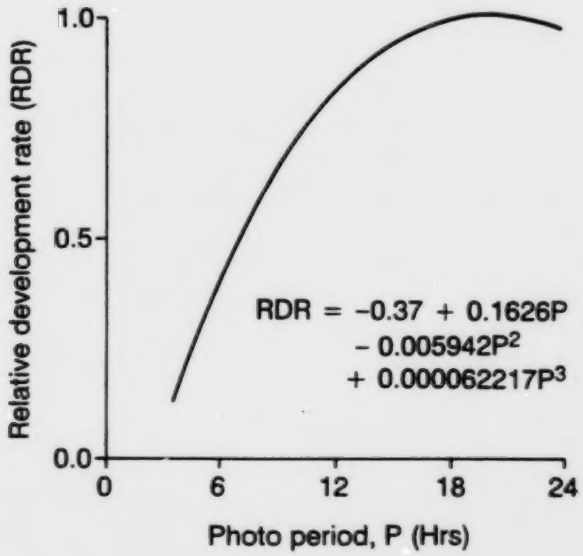

Figure 1. Relative development rate (RDR) as a function of photoperiod or daylength (P).

The PTU's required for first cut were evaluated by accumulating average daily PTU's (using 1951-80 temperature normals) from the time $T_{MN} \geq 5°C$ in spring to the average date of first cut of alfalfa at 26 locations across Canada. Average cutting dates were determined from reports on forage variety trials conducted by various co-operators in western Canada, Ontario and the Atlantic provinces (e.g. Ontario Forage Crops Committee, 1968; Atlantic Committee on Crops, 1982; Expert Committee on Forage Crops, 1983). Observed average cutting dates were based on the data from these regional reports; available data ranged from as little as two years to more than ten years. Using this procedure, it was determined that alfalfa requires approximately 480 PTU's to reach maturity for first cut. It was assumed that regional trials were harvested around the time when early to medium maturing varieties of alfalfa reach early bloom stage. Some cultivars could require more or less than 480 PTU's for first cut, but these variations were not taken into consideration in FORYLD. Since alfalfa is often grown with timothy or bromegrass, it was assumed that the same PTU accumulation applied to grass species.

A variety of RDR functions, similar to that of Fig. 1, which assumed either a greater or lesser effect of photoperiod on RDR, were also tried (including a constant RDR of 1.0, in which case PTU's equal GDD's). The results indicated, reasonable estimates could be made with various functions including GDD's and that, therefore, selection was not critical. However, the function shown in Fig. 1 was chosen since it resulted in the lowest standard deviation (3-4 days) of the difference between average estimated and observed cutting dates at the 26 locations.

Latitudes of locations used in these cutting date tests ranged from as far south as Ridgetown, Ontario (42°N) to as far north as Fort Vermilion, Alberta (58°N). This provided considerable range in daylengths (15 versus 18 hours, respectively, on June 25). The influence of time of year on daylength is also taken into consideration using the PTU concept. Locations with late springs due to cool temperatures will generally experience longer daylengths during the first growth period than other locations at the same latitude which warm up earlier in the spring.

2.2.2. Criteria for estimating dates of additional cuts

Criteria for scheduling additional cuts were developed from available data on cutting dates from regional variety trials of alfalfa, timothy and bromegrass. For alfalfa, cutting dates depend primarily on

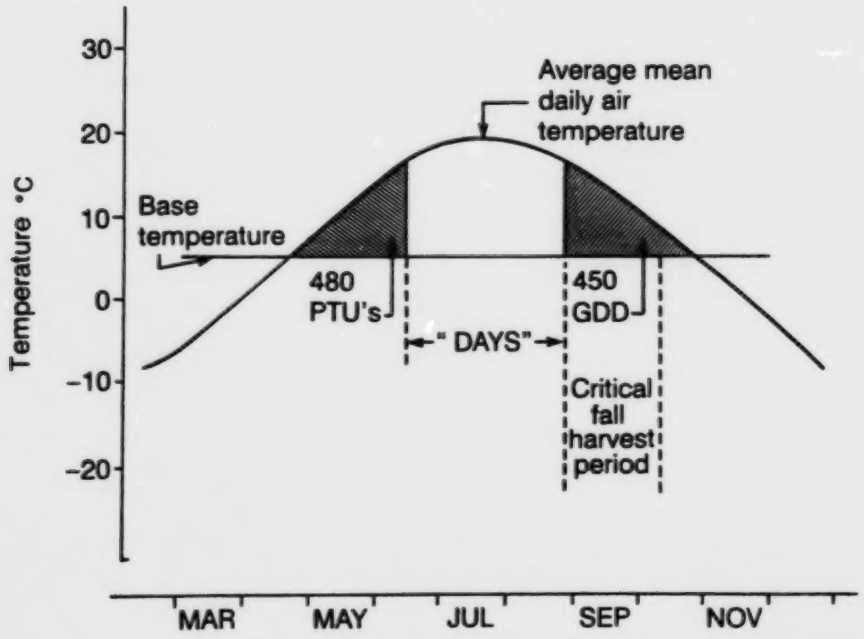

Figure 2. Relationship between the average mean daily air temperature and the variable DAYS used in selection of cutting date criteria for alfalfa.

Table 1. Criteria for estimating average cutting dates for Alfalfa - Option 1.

DAYS†	Number of cuts	Cutting date criteria			
		1st cut	2nd cut	3rd cut	4th cut
<0	0-1	480 PTU (No cut if date is 42 days before GSE††).	-	-	-
0-21	1-2	480 PTU	Optional at GSE	-	-
22-43	2	480 PTU	Earliest of: a) 15 days after D_{450} b) 44 days after 1st cut		
44-55	2-3	480 PTU	44 days after 1st cut	Optional at GSE	-
56-59	3	480 PTU	44 days after 1st cut	GSE	
60-79	3	480 PTU	Latest of: a) DAYS/2 after 1st cut b) 32 days after 1st cut	Latest of: a) DAYS/2 after 2nd cut b) 32 days after 2nd cut	
≥80	3-4	480 PTU	$\frac{DAYS-10}{2}$ after 1st cut	$\frac{DAYS-10}{2}$ after 2nd cut	Optional at GSE

† Number of days from date when 480 PTU have accumulated in spring to D_{450}.

†† GSE is growing season end, defined by the date when average mean daily air temperature first drops to 5°C or lower in autumn. The model assumes that the maximum number of days for growth is 60 days for a cut taken at the GSE, i.e. no additional dry matter accumulates after 60 days even if harvest is delayed to the GSE.

the number of days (DAYS) between the first cut and the start of the critical fall harvest period (D_{450}) as shown in Fig. 2. Normally alfalfa should not be harvested during the critical 4-6 weeks period before killing frost, so that sufficient food reserves can be accumulated in the roots to decrease the chance of winter injury (Woolley and Wilsie, 1961; Fulkerson, 1970). The start of the critical fall period was estimated from the time when an average of 450 GDD still remained in the fall (Bootsma and Suzuki, 1985).

The need to avoid harvesting during the critical period is still somewhat controversial. Cutting during this period may be relatively safe if winterkill is not usually a problem or if harvesting frequency is not too intense. Experimental data at Kamloops, B.C. (Stout, 1986) suggest that allowing sufficient time between cuts is more crucial for maintaining a healthy stand than avoiding harvest during the traditional critical period for that region.

Since different cutting strategies can often be employed for alfalfa with similar success, two sets of cutting date criteria (Option 1 and Option 2) were developed (Tables 1 and 2). Option 1 contains the main criteria used in FORYLD. However, for selected values of the variables DAYS, a second cutting option is also applied (Table 2). If the last

Table 2. Criteria for estimating average cutting dates for alfalfa - Option 2 (only if different from Option 1).

DAYS	No. of cuts	Cutting date criteria		
		1st cut	2nd cut	3rd cut
22-29	2	480 PTU	GSE	-
35-43	2-3	480 PTU	D_{450}	Optional at GSE
60-79	3	480 PTU	55 days after 1st cut	GSE
$\geq$80	3	480 PTU	$\frac{DAYS+5}{2}$ days after 1st cut	$\frac{DAYS+5}{2}$ days after 2nd cut

cut is optional, it implies that this cut can be safely harvested only if winter injury is not a significant problem. If winter injury is a concern, improved survival may be achieved by leaving the fall growth to help catch snow for additional protection.

Cutting date criteria for grasses (Table 3) are based on the number of days (GDAYS) between first cut and the time when 400 GDD remain in the fall (D_{400}). Since grasses are more winterhardy than alfalfa, there is less concern about avoiding harvest during a critical fall rest period.

Table 3. Criteria for estimating average cutting dates for grasses.

GDAYS†	No. of cuts	Cutting date criteria		
		1st cut	2nd cut	3rd cut
<25	0-2	480 PTU*	Optional 55 days after 1st cut*	-
≥25	2-3	480 PTU	55 days after 1st cut	Optional 55 days after 2nd cut*

† No. of days from date when 480 PTU have accumulated in spring to D_{400}.
* Cut is not possible if date is <30 days before GSE.

2.2.3. Validation of cutting date criteria

Cutting date criteria for alfalfa and grasses (timothy, bromegrass and wheatgrass) were validated by comparing estimated average dates based on criteria in Table 1 and 3 with observed average cutting dates at various locations (Appendix 1). Observed data were obtained from three sources: a) variety performance trials conducted across Canada (e.g. Ontario Forage Crops Committee, 1968; Atlantic Committee on Crops, 1982; Expert Committee on Forage Crops, 1983); b) Agriculture Canada, LRRC CANSIS performance management file (Dr. K.B. MacDonald, personal commun.); c) various scientific papers in the literature. Much of the data from regional performance trials were also used in developing the criteria, and thus, this validation is not strictly independent.

Estimated and observed average cutting dates were highly correlated ($r \geq 0.83$) for each of three cuts of alfalfa and the first cut of grass (Table 4). Lower correlation for the second cut of grass was expected

Table 4. Correlation coefficient (r) between cases of estimated and observed average cutting dates for alfalfa and grasses.

Crop	Cut number	Number of cases	r
Alfalfa	1	44	0.92
Alfalfa	2	28	0.95
Alfalfa	3	8	0.98
Alfalfa	1-4	81	0.99
Grasses	1	16	0.83
Grasses	2	10	0.41
Grasses	1-2	26	0.96

since the critical fall harvest period is not normally important for winter-hardy grasses, thus allowing for more flexibility in harvest management. Correlation coefficients for all cuts combined were very high ($r \geq 0.96$) since cutting dates are also correlated with time.

The linear relationships between estimated and observed average cutting dates are shown graphically in Fig. 3. These tests indicate that cutting date criteria in Tables 1 and 3 are generally suitable for

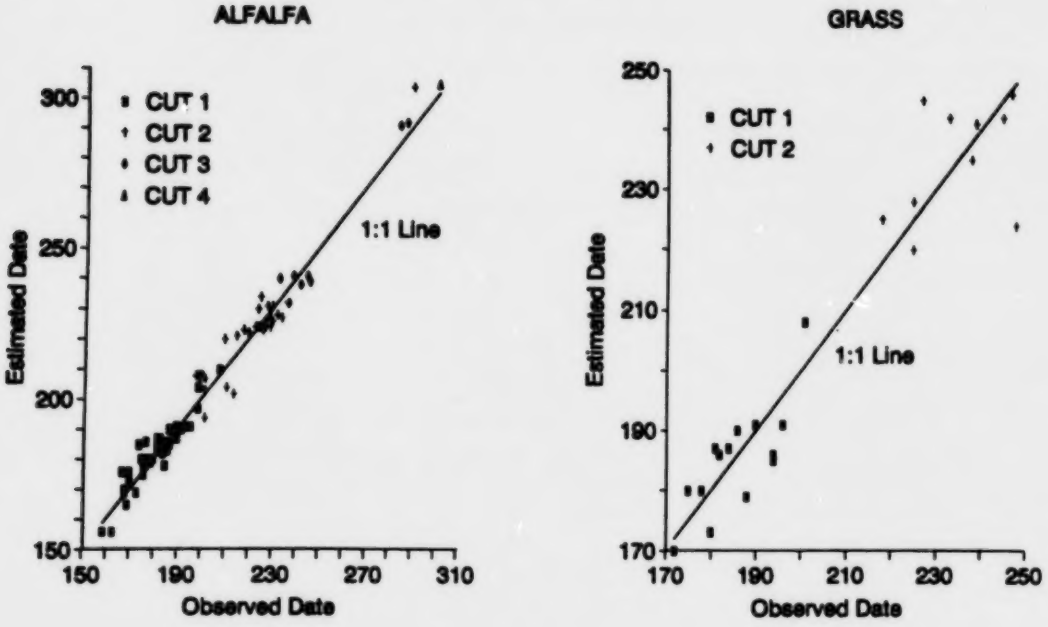

Figure 3. Comparison between average estimated and observed cutting dates (Calender day) for up to four cuts of alfalfa and two cuts for grasses.

alfalfa and grasses. However, this is not a rigorous validation since: a) some observed average cutting dates are based on relatively few years of data; b) stage of maturity at cutting was often not recorded and could vary and c) climatic stations used may not always represent the test location adequately.

Insufficient data were available to statistically validate Option 2 (Table 2). However, enough cases suggested this option to be a valid alternative cutting strategy under some conditions.

2.3. Additional Modifications to the FAO Model for Application for Forages

2.3.1. Workability factor

Adequate information was not available to estimate harvest losses for forages for inclusion in FORYLD. The workability factor in the FAO model (Stewart, 1983) was based on soil moisture during the fall harvest period. However, harvest losses in forages depend more on above ground conditions (precipitation and evaporation) than on moisture in the soil. Thus, this factor was set equal to 1.0.

2.3.2. Respiration losses

The maintenance respiration function C_t in equation (1) is computed in the FAO model by the expression

$$C_t = C_{30} (0.044 + 0.0019T + 0.0010T^2) \quad (7)$$

where C_{30} is the maintenance respiration coefficient at 30°C and T is the mean air temperature over the growing season. FORYLD assumed values of 0.0283 and 0.0108 for C_{30} for alfalfa and grasses, respectively (i.e. the values used for legume and non-legume crops in the FAO model).

2.3.3. Leaf area index (LAI)

The maximum crop growth rate in the FAO model was adjusted when maximum LAI was < 5.0 (Stewart, 1983). This directly affected the constraint-free net biomass production (B_N) in equation 1. LAI was also used to split total evaporation between bare soil evaporation and plant transpiration. In the FAO model, daily LAI values were simulated from the progression in growing season length from LAI curves for annual crops. However, these curves were found to underestimate the typical LAI for perennial forages reported in the literature (Hunt et al., 1970; Carter and Sheaffer, 1983). The procedures used to estimate LAI in FORYLD for alfalfa were based on typical LAI curves reported in the literature. Maximum LAI was assumed to be 6.5 for the first cut and 6.0 for the second and third cut. If the last cut occured at the end of the growing season, a maximum LAI of 4.5 was assumed. Maximum LAI is only reached after a growth period of $\geq$ 45 days. For growing periods (GSL) of < 45 days, the LAI is estimated by the formula

$$\text{LAI} = \text{Maximum LAI} \times \frac{\text{GSL}}{\text{Maximum GSL}} \quad (8)$$

where the maximum LAI is as noted above and the maximum GSL is 45 days.

For grasses, maximum LAI was assumed to be 6.0 for the first cut and 4.0 for any additional cuts. Maximum GSL was set at 55 days.

2.3.4. Start of growing season

The FAO model assumed the start of the growing season for annual crops as the day on which the average daily minimum air temperature exceeded 5°C (Stewart, 1983). The growing season for perennial forages is longer; in FORYLD it was assumed to coincide with the period when the average daily mean air temperature (T_{MN}) exceeded 5°C (Chapman and Brown, 1966). The first growth period began at the start of the growing season and ended when the first cut was taken. Growth periods for later cuts began the first day following the previous cut and ended on the cutting date.

2.3.5. Soil moisture budgeting

In FORYLD soil water budgeting was initiated in spring (known as the Moisture Growing Season Start, or MGSS) (Stewart, 1983) when the average daily potential evapotranspiration (PE) first exceeded average daily precipitation (P) or on the first date when T_{MN} exceeded 5.0°C, whichever occured last. The latter date corresponded closely to the time when average snow depth was less than 2.5 cm for seven consecutive days as reported in the Hydrological Atlas of Canada (Fisheries and Environment Canada, 1978). Thus, it was assumed that the soil surface had thawed, and evaporation proceeded normally after this date.

2.3.6. Harvest index

A harvest index (H_i) of 0.95 was assumed for FORYLD, meaning that almost all of the net biomass production was available for harvest. A small portion (5%) was assumed as unharvested stubble and wastage.

2.4. Simulation of Potential Net Dry Matter Yield

2.4.1. Assumptions for maximum crop growth rate

Constraint-free net biomass production (B_N) is a function of b_{gm}, the maximum rate of gross biomass production (eq. (1)). b_{gm} is in turn affected by the rate of biomass production on clear and overcast days and the fraction of the day that the sky is overcast (Stewart, 1983). b_{gm} is further adjusted depending on the maximum leaf photosynthesis rate (P_m), which is a function of the seasonal mean daytime temperature (T_{mdt}) and the crop species. McBride and Brown (1984) calibrated P_m versus T_{mdt} curves for six forage species (all C_3 crops) using yield data from forage variety trials in Ontario. Curves for medium maturing alfalfa and for timothy were selected from McBride and Brown (1984) for use in FORYLD as follows:

for alfalfa,

$$P_m = -57.6446 + 8.2645\ T_{mdt} - 0.2066\ (T_{mdt})^2 \qquad (9)$$

for grasses,

$$P_m = 3.0667\ T_{mdt} - 0.1022\ (T_{mdt})^2 \qquad (10)$$

These relationships are compared with the P_m versus T_{mdt} curve used for C_3 crops in the FAO model (Fig. 4).

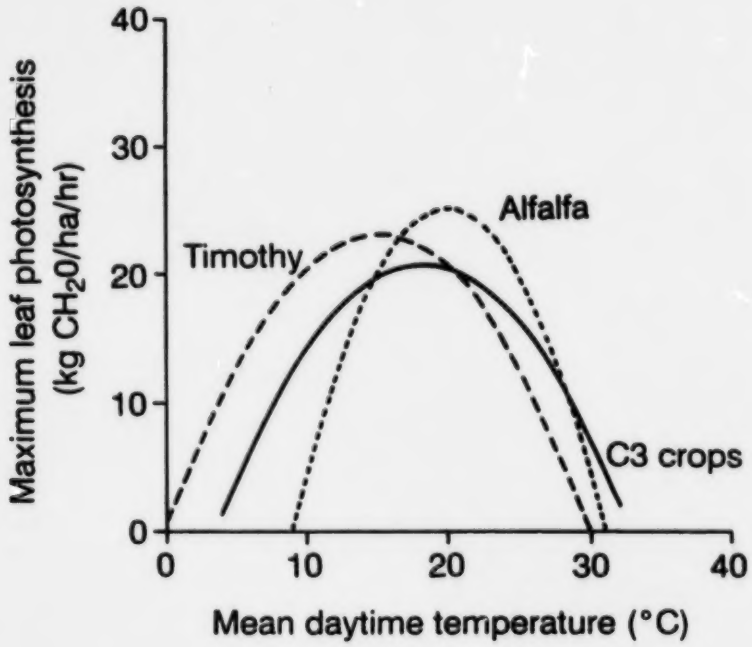

Figure 4. Relationship between maximum leaf photosynthetic rate (Pm) and mean daytime temperature (T_{mdt}).

2.4.2. Validation of potential (constraint-free) yield

Estimates of potential forage yields with no moisture stress (B_y, eq. (2)) were compared with observed yields from regional variety performance trials for selected locations in Canada (Table 5). Several years with the highest yields were selected, assuming that there would be little or no moisture stress in these years. However, since some stress due to moisture deficits may occur even in the best years, the observed yields are themselves only estimate of potential yield. Management factors such as fertilizer applications and harvest dates may also have influenced observed yields. In western Canada, observed yields were extracted from data on irrigated trials. A yield was determined for each trial-year by averaging data for selected standard varieties. Effects of age of stand on yields was minimized by using data only from the first three years after establishment.

Table 5. Comparison between estimated (EST) and observed (OBS) average potential dry matter yields of a) alfalfa and b) timothy.

Location	Dry matter yield (t/ha) & data use ratio										
	Cut 1			Cut 2			Cut 3			Total	
	EST	OBS	n/N†	EST	OBS	n/N	EST	OBS	n/N	EST	OBS
a) Alfalfa											
Kamloops, B.C.††	8.5	5.6	2/10	4.9	5.2	3/10	3.9	3.7	3/10	17.3	14.5
Swift Current, Sask.††	9.1	9.5	4/13	5.8	5.5	4/13	-	-	-	14.9	15.0
Ridgetown, Ont.	8.0	7.5	4/19	4.6	6.2	2/19	4.2	3.8	4/19	16.8	17.5
Ottawa, Ont.	8.0	6.8	3/12	4.4	3.7	2/12	4.0	3.6	1/12	16.4	14.1
Charlottetown, P.E.I.	8.3	7.7	2/8	5.2	5.0	1/8	-	-	-	13.5	12.7
Average:	8.4	7.4		5.0	5.1		4.0	3.7		15.8	14.8
b) Timothy											
Ridgetown, Ont.	8.9	8.3	2/11	4.7	4.2	2/10	-	-	-	13.6	12.5
Ottawa, Ont.	8.6	7.8	3/19	5.0	5.0	2/15	-	-	-	13.6	12.8
Kapuskasing, Ont.	9.3	6.8	2/16	5.7	4.9	2/16	-	-	-	15.0	11.7
Truro, N.S.	9.8	8.7	2/14	5.6	3.4	2/11	-	-	-	14.9	12.1
Charlottetown, P.E.I.	9.4	8.9	3/17	5.5	4.2	3/16	-	-	-	14.5	12.4
Average:	9.2	8.1		5.3	4.3		-	-	-	14.5	12.4

† n is the number of years data with high yields used to compute OBS; N is the total number of years for which yield observations were available.

†† Yield data is based on irrigated variety trials at these locations.

Potential dry matter yields estimated by FORYLD were, on average, about 1 t/ha higher than observed yields (Table 5). At several individual locations, the estimated yields were almost 3 t/ha above observed values (e.g. alfalfa cut 1 at Kamloops; timothy cut 1 at Kapuskasing). Low observed yields at these locations are most likely due to below optimum management levels or due to moisture stress. In several instances model estimates were lower than observed yields (e.g. alfalfa cut 2 at Ridgetown). This could be due to differences in length of growing period used in the model in comparison to the field trial or because of better than average temperature and/or solar radiation during a growth period. However, since model estimates were based on long term normals, reasons for yield differences could not be positively identified.

Estimated potential dry matter yields were compared with observed values for a number of additional locations not shown in Table 5. In most cases, observed yields were lower than estimated values. Largest differences were experienced for the first cut of alfalfa, where observed potential yields were typically 2 to 3 t/ha lower. It is likely that even in the best years, forages grown in regional performance trials do not always reach the maximum potential yield due to below optimum management levels (i.e. fertility), moisture stress and/or winter injury.

Overall, the model seems to provide reasonable estimates of the potential constraint-free yield of forages. The comparative tests are only a general indicator and not a rigorous validation of the model. Differences in estimated potential yields between locations for individual cuts (Table 5) are relatively small. This may be expected, since potential yields are only affected by temperature, solar radiation and length of growing period and not by moisture supply. The number of cuts that are feasible is the greatest factor affecting the potential yield of forages at a given location.

2.5. Simulation of Anticipated Dry Matter Yields

2.5.1. Model procedures and modifications

The modified FAO model estimates anticipated dry matter yields (B_{ya}) by reducing potential yields (B_y) by a moisture stress factor (MSF) computed from the AE/PE ratio (Section 2.1, eq. (3) and (4)). Estimated yields using the FAO procedure to compute the MSF were compared with average observed yields from regional variety performance trials at sixteen locations across Canada for the first two cuts of alfalfa and nine locations for two cuts of timothy. The yield response factory K_y was assumed to be 1.0 and 1.1 for alfalfa and timothy respectively. Soil available water-holding capacity (AWC) was estimated from soil particle size information obtained from trial reports or directly from co-operators. The relationship between particle size and AWC was taken from DeJong and Shields (1988) and is shown in Table 6.

Applying these relationships directly to the modified FAO model gave unsatisfactory results. On the average, forage yields were overestimated by about 70% and 26% respectively for the first two cuts of

Table 6. Relationship between available water-holding capacity and soil particle size group (from DeJong and Shield, 1988).

Available water-holding capacity (mm)	Soil particle size groups
50	Sand; loamy sand
100	Sandy loam
150	Very fine sandy loam; clay
200	Silt loam; sandy clay; clay loam
250	Silty clay loam; sandy clay; /silty clay; clay; heavy clay

alfalfa, and by about 40% and 70%, respectively, for the first two cuts in timothy. Estimates were relatively insensitive to changes in K_y and AWC, and thus, could not be readily improved by adjusting these parameters. For these reasons, a different procedure was used to compute the MSF.

The approach adopted was that of McBride and Brown (1984), in which the MSF is related to a parameter known as the soil moisture deficit-surplus (SMDS). The SMDS is computed as follows:

$$SMDS = P + \theta_i - PE \qquad (11)$$

where P is the total precipitation during the growth period.

θ_i is the plant-available soil water content at the start of the growth period.

and PE is the total potential evapotranspiration during the growth period.

McBride and Brown (1984) calibrated the relationship between MSF and SMDS using annual forage yield data from variety performance trials in Ontario. However, because of much drier conditions on the prairies, recalibration of the MSF versus SMDS curve was necessary and this was accomplished by plotting actual MSF versus SMDS for all available locations with alfalfa and timothy yield data.[9] A hand-fitted curve was drawn through the higher MSF values (low MSF values were assumed to be due to below optimum management or poor stand persistence). Actual MSF values were determined by:

$$MSF = \frac{B_a}{B_y} \qquad (12)$$

where B_a is the average dry matter yield observed for all available years in regional variety performance trials.

B_y is the constraint-free (potential) net dry matter yield estimated by FORYLD.

The relationship between MSF and SMDS used in FORYLD is shown in Figure 5 and is presented by the following cubic polynomial equation:

$$MSF = 0.594 + 2.426\ SMDS - 1.423(SMDS)^2 - 7.905(SMDS)^3 \quad (13)$$

where SMDS is in metres. This estimate of MSF was then used in the calculations of anticipated dry matter yield (B_{ya}).

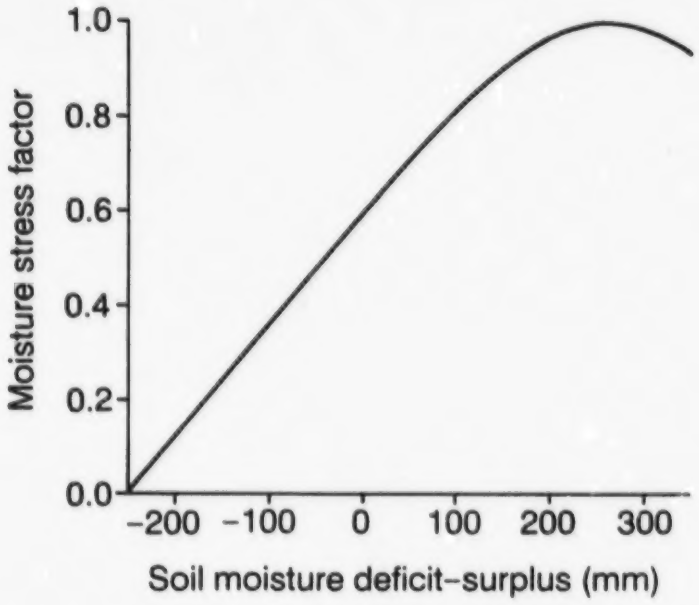

Figure 5. Relationship between the moisture stress factor (MSF) and the soil moisture deficit - surplus (SMDS).

As in the case of McBride and Brown (1984), this relationship was found to be equally valid for both alfalfa and timothy, and applicable for all cuts.

2.5.2. Validation of anticipated dry matter yield (B_{ya})

a) Alfalfa and timothy yield validation

Model estimates were compared with average observed yields at selected locations across Canada for up to three cuts of alfalfa (Table 7) and two cuts of timothy (Table 8), in order to validate as

Table 7. Comparison between observed and estimated average anticipated dry matter yield (B_{ya}) for alfalfa.

Location	Soil AWC	Observed average yield (t/ha)/ # of trial-years*				Estimated yield (t/ha)			
		Cut 1	Cut 2	Cut 3	Total	Cut 1	Cut 2	Cut 3	Total
Lacombe, Alb.	200	4.0/20	2.8/20	-	6.8	5.3	3.4	-	8.7
Indian Head, Sask.	250	3.0/26	2.4/7	-	5.4	4.9	2.9	-	7.8
Swift Current, Sask.	150	2.3/37	1.5/18	-	3.8	2.1	1.4	-	3.5
Brandon, Man.	200	3.9/22	2.3/22	-	6.2	4.8	2.8	-	7.0
Guelph, Ont.	130†	4.9/37	3.2/35	2.7/29	10.8	5.9	2.4	2.4	10.6
Kapuskasing, Ont.	50†	3.4/27	2.4/27	-	5.8	4.7	2.8	-	7.5
Kemptville, Ont.	100†	5.1/24	2.4/20	2.5/18	10.0	5.0	2.1	2.2	9.3
New Liskeard, Ont.	70†	4.7/22	2.9/20	-	7.6	4.5	2.8	-	7.2
Ottawa, Ont.	130†	4.9/26	2.8/26	2.3/25	10.0	5.5	2.5	2.4	10.3
Ridgetown, Ont.	200	6.0/47	3.9/47	3.0/25	12.9	6.8	3.1	2.7	12.7
Truro, N.S.	100	4.2/12	2.9/12	-	7.1	6.0	3.2	-	9.3
Charlottetown, P.E.I.	150	6.0/20	3.2/20	-	9.2	6.2	3.3	-	9.5
Mean		4.4	2.7	2.6	8.0	5.1	2.7	2.4	8.6

† AWC based on McBride and Brown (1984); all others are estimated using soil particle size groups in conjunction with Table 6.

* Data may include more than one trial in a given year at each location.

Table 8. Comparison between observed and estimated average anticipated dry matter yield (B_{ya}) for timothy.

Location	Soil AWC	Observed average yield (t/ha)/# of trial-years*			Estimated yield (t/ha)		
		Cut 1	Cut 2	Total	Cut 1	Cut 2	Total
Guelph, Ont.	130†	7.4/28	2.3/24	9.7	6.4	2.7	9.1
Kapuskasing, Ont.	50†	4.4/32	2.5/30	6.9	5.0	3.7	8.8
Kemptville, Ont.	100†	6.0/14	3.6/8	9.6	5.4	2.1	7.5
Ottawa,Ont.	130†	5.2/53	2.3/33	7.5	5.9	2.5	8.5
Ridgetown, Ont.	200	6.6/14	2.9/13	9.5	7.5	2.7	10.2
Fredericton, N.B.	100	5.2/53	2.3/33	7.5	6.2	2.9	9.1
Truro, N.S.	100	6.4/15	2.4/12	8.8	6.6	3.6	10.3
Charlottetown, P.E.I.	150	7.0/20	3.1/19	10.0	7.0	3.4	10.4
Mean		6.0	2.7	8.7	6.3	3.0	9.2

† AWC based on McBride and Brown (1984); all others are estimated using soil particle size in conjunction with Table 6.

* Data may include more than on trial in a given year at each location.

much as possible anticipated dry matter yield estimates produced by FORYLD. Observed average yields were calculated by averaging annual yields observed in forage variety trials conducted in the various regions of Canada (e.g. Ontario Forage Crops Committee, 1968; Atlantic Committee on Crops, 1982; Expert Committee on Forage Crops, 1983). Only yields based on data from the first and second year after the year of establishment were used to compute an average. Thus, effects of decline in stand persistence and of winter injury were minimized. In cases where significant winter injury was noted with trial results, the yields were omitted from the averaging procedure. The source of soil AWC information used in estimating B_{ya} is indicated in the tables. AWC's were either estimated from soil particle size information for the trial location used in conjunction with Table 6, or they were taken from estimates provided by McBride and Brown (1984). The number of trial-years of regional variety trial data from which observed average yields were computed are shown in the tables. Some years contain data from more than one trial at a location.

Mean estimated yields for alfalfa for all cuts combined were only 0.6 t/ha higher than the mean observed average for twelve locations (Table 7). There was a good correlation ($r = 0.91$) between estimated and observed alfalfa yields for all cuts combined at individual locations and the values followed closely to the 1:1 relationship (Fig. 6). For timothy, mean average estimated yield for all locations was within 0.3 t/ha of mean observed yields for both cuts 1 and 2 (Table 8). At some locations, estimated yields exceeded the observed by more than

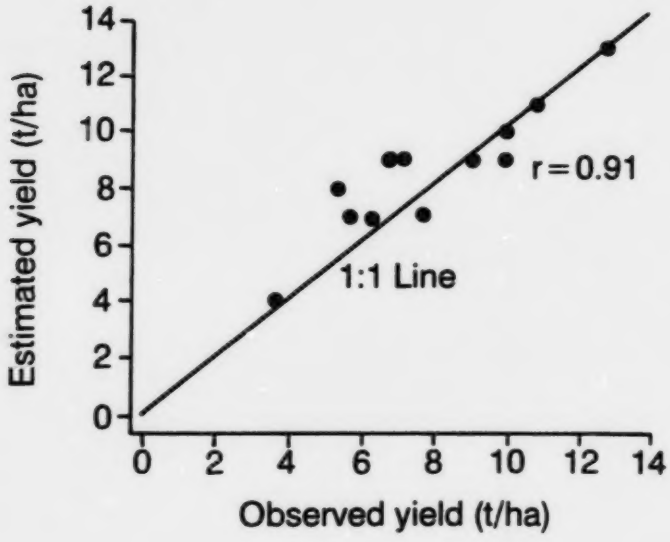

Figure 6. Comparison between average estimated and observed anticipated dry matter yield for all cuts of alfalfa combined (two-three cuts).

1 t/ha (e.g. first cut alfalfa at Indian Head, Kapuskasing and Truro; first cut timothy at Fredericton, second cut at Kapuskasing, Kemptville and Truro).

Some large differences between estimated and observed yields may be expected for several reasons: (i) soil AWC is only an approximate estimate; in many cases estimated yields would coincide with observed values if the AWC was adjusted by only one category (50 mm) or less; (ii) weather conditions during the trial years may have differed significantly from normal, particularly if relatively few years' data were available; and (iii) observed yields may have been influenced by management level, stand persistence, winter survival and varietal differences. While these tests do not provide a rigorous validation of the model, they do indicate that FORYLD provides reasonable estimates of both alfalfa and timothy yields under rainfed conditions. Although no specific comparisons were made with bromegrass yields, cutting schedules and yields are expected to be similar to timothy.

b) Wheatgrass yield validation

Observed yields on crested and intermediate wheatgrass were extracted and averaged from regional trial reports in western Canada (e.g. Expert Committee on Forage Crops, 1983). Data for the first three years only after the year of establishment were used. Comparisons between observed yields and those estimated for grasses by FORYLD are shown in Table 9 for crested and Table 10 for intermediate wheatgrass.

Estimated yields assume a soil AWC of 200 mm unless soil textural information was available, in which case, Table 6 was used to determine the AWC. Estimated mean yields averaged for all locations were within 0.1 t/ha of observed yields for both crested and intermediate wheatgrass. However, differences between observed and estimated yields for individual locations were frequently 0.5 t/ha or more. These differences may be expected since soil AWC values are very approximate and since observed yields are often based on only a few years' data. As was the case with alfalfa and timothy, yield estimates would coincide with observed values in most cases with an adjustment in AWC of only one category (50 mm) or less. Although these results do not constitute a rigorous test of the model, they indicate that the grass component of FORYLD provides reasonable estimates of anticipated dry matter yields of crested and intermediate wheatgrasses in western Canada.

3. SUMMARY AND CONCLUSIONS

The modified FAO model has been successfully used to estimate potential and anticipated dry matter yields of alfalfa and of several grass species grown in Canada. The model does not distinguish between grass species, i.e. the estimated yields represent those for the species best adapted to a particular region whether that be timothy, bromegrass or crested/intermediate wheatgrass. Subroutines which estimate growth periods and cutting schedules of alfalfa and grasses were developed since these are of crucial importance to the model; yields are often

Table 9. Comparison between observed and estimated average anticipated dry matter yield (B_{ya}) for crested wheatgrass.

Location	Soil AWC	Cut No.	No. years of data	Dry matter yield (t/ha) Observed††	Estimated
Lacombe, Alb.	200*	1	3	5.8	5.9
Indian Head, Sask.	200*	1	4	5.3	4.6
Melfort, Sask.	200	1	3	4.9	4.7
Melfort, Sask.	200	2	3	2.4	2.9
Saskatoon, Sask.	200	1	14	4.5	3.7
Swift Current, Sask.	250*	1	6	2.1	2.8
St. Claude, Man.†	200	1	3	6.1	5.9
St. Claude, Man.†	200	2	3	2.0	2.5
Mean				4.1	4.1

† Climatic data from Deerwood, Man., was used to estimate yield.
†† Average may include data from more than one trial in each year.
* Soil AWC's based on soil particle size information; all others are assumed values.

Table 10. Comparison between observed and estimated average anticipated dry matter yield (B_{ya}) for intermediate wheatgrasses.

Location	Soil AWC	Cut No.	No. years of data	Dry matter yield (t/ha) Observed††	Estimated
Beaverlodge, Alb.	200	1	8	5.1	6.0
Beaverlodge, Alb.	200	2	6	2.1	3.8
Lacombe, Alb.	200*	1	4	6.3	5.9
Lacombe, Alb.	200*	2	4	3.8	3.7
Lethbridge, Alb.	200	1	8	4.3	4.3
Lethbridge, Alb.	200	2	2	2.3	1.5
Indian Head, Sask.	200*	1	12	4.4	4.6
Melfort, Sask.	200	1	6	5.5	4.7
Saskatoon, Sask.	250*	1	9	4.2	3.7
Swift Current, Sask.	200*	1	11	2.4	2.8
Swift Current, Sask.	200*	2	4	0.5	1.2
Mean				3.7	3.8

†† Average may include data from more than one trial in each year.
* Soil AWC's based on soil particle size information; all others are assumed values.

heavily dependent on the number of cuts that can be taken. Other modifications of the FAO model included: (i) adjustment of the maximum photosynthetic rate versus temperature curve, (ii) change in the method used to calculate leaf area index and (iii) a change in the method used to determine the moisture stress factor which is used to derive anticipated yields from potential (constraint-free) yields.

Precise validation of a model such as FORYLD which computes average yields from climatic normals data is not possible due to the difficulty in obtaining suitable long-term observed yields from various locations. Nevertheless, results of validation presented here suggest that model estimates are generally within $\pm$ 1 t/ha of observed values, although individual locations may vary by as much as $\pm$ 2 t/ha. Larger yield differences between the model estimates and average yields observed in the field at some locations are likely due to management factor, stand persistence and/or overwintering damage. These factors could not be accounted for in the present model.

The yield estimates generated when FORYLD is applied to the appropriate climate data on a geographic basis should provide a useful source of information for studies in land evaluation. Estimated yields represent production levels that are attainable under irrigated (potential yield) and rainfed (anticipated yield) conditions the first few years after establishment under optimum management levels and with no winterkill.

In recent years, increased emphasis has been placed on determining crop production risk as it relates to variability in yields over time for land evaluation (Dumanski and Kirkwood, 1988). However, since FORYLD does not estimate yields on an annual basis, the risk factor in forage production cannot be assessed using this model. New modelling efforts are underway which will develop the capability of estimating forage yields on annual basis and thereby provide the required risk data. Meanwhile, estimates from FORYLD will provide a base of information which will help in assessing land suitability for forages and the potential effects of irrigation on yields. The model could also be a useful tool in evaluating the potential impact of climatic change scenarios on forage yields in Canada.

4. REFERENCES

Allard, H.A. and Evans, M.W. 1941. Growth and flowering of some tame and wild grasses in response to different photoperiods. J. Agric. Res. 62:193-228.

Atlantic Committee on Crops, 1982. Forage evaluators reports. Distributed by: Dept. Plant Science, Nova Scotia Agric. College, Truro, N.S. 60pp.

Bootsma, A. 1984. Forage crop maturity zonation in the Atlantic region using growing degree-days. Can. J. Plant Sci. 64:329-338.

Bootsma, A. and Suzuki, M. 1985. Critical autumn harvest period for alfalfa in the Atlantic region based on growing degree-days. Can. J. Plant Sci. 65:573-580.

Carter, P.R. and Sheaffer, C.C. 1983. Alfalfa response to soil water deficits. I. Growth, forage quality, yield, water use, and water-use efficiency. Crop Science. 23:669-675.

Chapman, L.J. and Brown, D.M. 1966. The Climates of Canada for Agriculture. Canada Land Inventory Report No. 3, Revised 1978, Environment Canada, Land Directorate, Ottawa. 24pp.

Clayton, J.S., Ehrlich, W.A., Cann, D.B., Day, J.H. and Marshall, I.B. 1977. Soils of Canada, Vols 1 and 2. Research Branch, Canada Dept. of Agriculture, Ottawa. 239pp.

DeJong, R. and Shields, J.A. 1988. Available water-holding capacity maps of Alberta, Saskatchewan and Manitoba. Can. J. Soil Sci. 68:157-163.

DeRuiter, J.M. and Taylor, A.O. 1979. Annual cool-season legumes for forage III. Effects of temperature photoperiod and vernalisation on flowering. N. Z. J. Exp' tal Agric. 7:153-156.

DeWit, C.T. 1965. Photosynthesis of leaf canopies. Agric. Res. Rep. 663. Centre Agric. Public. Docum., Wageningen, 57pp.

Doorenbos, J. and Kassam, A.H. 1979. Yield response to water. F.A.O. Irrigation and Drainage Paper 33, FAO, Rome. 193pp.

Dumanski, J. and Stewart, R.B. 1983. Crop production potentials for land evaluation in Canada. Agric. Canada, Res. Branch, Land Resource Research Institute. Contribution 1983-13E. 80pp.

Dumanski, J. and Kirkwood, V., edit. 1988. Crop production risks in the Canadian prairie region in relation to climate and land resources. Agriculture Canada, Research Branch, Tech. Bull. 1988-5E. 144pp.

Evans, M.W. and Allard, H.A. 1934. Relation of length of day to the growth of timothy. J. Agric. Res. 48:571-586.

Evans, M.W. and Wilsie, C.P. 1946. Flowering of bromegrass, Bromus inermis, in the greenhouse as influenced by length of day, temperature, and level of fertility. J. Amer. Soc. Agron. 38:923-932.

Expert Committee on Forage Crops. 1983. Uniform variety tests of forage crops, contributed by research workers in western Canada (1983). Printed by Agriculture Canada, Research Branch. 170pp.

FAO. 1978. Report on the Agro-ecological zones project, Vol. 1. Methodology and results for Africa. World Soil Resources Report 48, FAO, Rome. 158pp.

Fisheries and Environment Canada. 1978. Hydrological Atlas of Canada. Map 10, Dates of formation and loss of snow cover. Ministry of Supply and Services Canada, Ottawa, Ont., Cat. No. En 37-26/1978.

Fulkerson, R.S. 1970. Location and fall harvest effects in Ontario on food reserve storage in alfalfa (Medicago sativa L.). In: Proc. XI Int. Grassland Congress, Univ. of Queensland Press, Queensland, Australia. pp. 555-559.

Gasser, H. and Lachance, L. 1969. Effect of dates of cutting on dry matter production and chemical content of alfalfa and birdsfoot trefoil. Can. J. Plant Sci. 49:339-349.

Harcourt, D.G. 1984. Heat units for alfalfa in southern Ontario. Agric. Canada, Ottawa, Canadex 121.10. 2pp.

Hunt, L.A., Moore, C.E. and Winch, J.E. 1970. Light attenuation coefficient and productivity in Vernal alfalfa. Can. J. Plant Sci. 50:469-474.

Irvine, R.B. and McElgunn, J.D. 1982. Effects of eight three-cut harvesting schedules on production of alfalfa forage under irrigation in southwestern Saskatchewan. Can. J. Plant Sci. 62:107-110.

Kilcher, M.R. and Heinrichs, D.H. 1974. Interpretive difficulties with erratic data from perennial forage crops grown in a semiarid region. Can. J. Plant Sci. 54:457-462.

Kirkwood, V., Dumanski, J., Bootsma, A., Stewart, R.B. and Huma, R. 1989. The land potential data base for Canada, User's handbook. Research Branch, Agric. Canada, Tech. Bull. 1983-4E. 53pp.

Ludwig, R.A., Barrales, H.G. and Steppler, H. 1953. Studies on the effect of light on the growth and development of red clover. Can. J. Agric. Sci. 33:274-287.

Lutwick, L.E. and Smith, A.D. 1977. Yield and composition of alfalfa and crested wheatgrass, grown singly and in mixture, as affected by N and P fertilizers. Can. J. Plant Sci. 57:1077-1083.

McBride, R.A. and Brown, D.M. 1984. A study of crop modelling alternatives for the hay and pasture insurance plan in Ontario. Report prepared for Crop Insurance Commission of Ontario, Toronto, Vol. 1 and 2. 166pp.

Ontario Forage Crops Committee, 1968. Forage Crops Investigations - Ontario. Report on Field Trials of Varieties and Mixtures. Unpubl. Report.

Stewart, R.B. 1983. Modelling methodology for assessing crop production potentials in Canada. Agric. Canada, Research Branch, Publ. 1983-12E, Ottawa, Ont. 29pp.

Stout, D.G. 1986. The critical fall harvest period for alfalfa in interior British Columbia. Can. J. Plant Sci. 66:565-578.

Woolley, D.G. and Wilsie, C.P. 1961. Cold unit accumulation and cold hardiness of alfalfa. Crop Sci. 1:165-167.

5. APPENDIX

Appendix 1. Observed and estimated average cutting dates used in validation of cutting date criteria.

A. 1ST CUT - ALFALFA

Location	Cutting date Estimated	Cutting date Observed†	Years data	Data source††
B.C.				
Creston	Jun 18	Jun 17[i]	3	a
Kamloops	Jun 5	Jun 12[i]	7	a
Kamloops	Jun 5	Jun 8[i]	5	c1
ALBERTA				
Beaverlodge	Jul 10	Jul 9	8	a
Calgary	Jul 9	Jul 11[di]	3	b
Calgary-Turner Valley	Jul 16[q]	Jul 18[d]	9	b
Calgary-Gleichen	Jul 5[q]	Jul 2[d]	4	b
Claresholm	Jul 2	Jul 2[d]	8	b
Edmonton	Jul 4	Jun 23	2	a
Edmonton	Jul 4	Jul 6[h]	3	b
Edmonton-Rochester	Jul 5[q]	Jul 5[h]	4	b
Fort Vermilion	Jul 3	Jul 5	5	a
Lacombe	Jul 6	Jul 5	8	a
Lethbridge[i]	Jun 28	Jun 28	4	a
Lethbridge	Jun 28	Jun 26[h]	4	b
Olds	Jul 10	Jul 14	14	b
Pekisko - Turner Valley	Jul 21	Jul 27		
Pincher Creek	Jul 10	Jul 15[e]	3	c2
Turner Valley	Jul 23	Jul 18[d]	9	b
Vulcan[i]	Jul 3	Jul 4[d]	5	b
SASKATCHEWAN				
Choiceland	Jul 2	Jul 3	2	a
Indian Head	Jun 29	Jun 29[f]	2	a
Melfort	Jul 1	Jul 1	4	a
SASK. (Cont'd)				
Saskatoon	Jun 27	Jul 4[i]	2	a
Saskatoon	Jun 27	Jun 26[i]	2	a
Swift Current	Jun 29	Jun 26[i]	11	a
Swift Current	Jun 29	Jun 24[i]	8	c3
Swift Current	Jun 29	Jun 27	8	a
MANITOBA				
Brandon	Jun 26	Jun 25	2	a
Winnipeg	Jun 25	Jun 19	2	a
ONTARIO				
Elora	Jun 25	Jun 16[j]	3	a
Guelph	Jun 22	Jun 19	7	a
Kapuskasing	Jul 10	Jul 14	7	a
Kemptville	Jun 19	Jun 17	7	a
New Liskeard	Jul 2	Jul 1	5	a
Ottawa	Jun 18	Jun 22	6	a
Ridgetown	Jun 14	Jun 18	10	a
Thunder Bay	Jul 9	Jul 6	4	a
QUEBEC				
Lennoxville	Jun 24	Jun 25	2	c4
ATLANTIC PROV.				
Charlottetown	Jul 6	Jul 2	9	a
Fredericton	Jun 29	Jun 27	6	a
Nappan	Jul 6	Jul 1[h]	7	a
St. John's West	Jul 27	Jul 19	9	a
Truro	Jul 5[p]	Jun 26	14	a

Appendix 1. (Cont'd).

B. 2ND CUT - ALFALFA

Location	Cutting date Estimated	Cutting date Observed†	Years data	Data source††
B.C.				
Creston	Jul 21	Aug 2	3	a
Kamloops	Jul 13	Jul 21[gi]	2	a
ALBERTA				
Edmonton	Aug 17	Aug 11	3	a
Fort Vermilion	Aug 12	Aug 15	5	a
Lethbridge	Aug 11	Aug 6[i]	10	a
Lethbridge	Aug 11	Aug 14[hi]	2	b
Vulcan	Aug 16	Aug 20[hi]	4	b
SASKATCHEWAN				
Choiceland	Aug 15	Aug 17	2	a
Indian Head	Aug 12	Aug 13	2	a
Melfort	Aug 14[k]	Aug 15	4	a
Tisdale	Aug 14[k]	Aug 18	2	a
Saskatoon	Aug 10	Aug 8	4	a
Swift Current	Aug 12	Aug 14[i]	11	a
Swift Current	Aug 12	Aug 12[i]	3	a

C. 3RD CUT - ALFALFA

Location	Cutting date Estimated	Cutting date Observed†	Years data	Data source††
B.C.				
Kamloops	Aug 20	Aug 25[gi]	2	a
SASKATCHEWAN				
Swift Current	Oct 19	Oct 15[i]	4	a
MANITOBA				
Brandon	Oct 18	Oct 12	2	a
ONTARIO				
Elora	Aug 28[j]	Aug 22	3	a
Guelph	Aug 29	Aug 27	4	a
Kemptville	Aug 26	Aug 30	5	a
Ottawa	Aug 27	Sep 3	4	a
Ridgetown	Aug 29	Sep 2	9	a
MANITOBA				
Brandon	Aug 9	Aug 3	2	a
Winnipeg	Aug 8	Jul 29	2	a
ONTARIO				
Elora	Jul 27[i]	Jul 17	3	a
Guelph	Jul 26	Jul 21	5	a
Kemptville	Jul 23	Jul 19	5	a
New Liskeard	Aug 15	Aug 22	3	a
Ottawa	Jul 23	Jul 30	6	a
Ridgetown	Jul 23	Jul 22	9	a
Thunder Bay	Aug 22	Aug 13	3	a
ATLANTIC PROV.				
Charlottetown	Aug 19	Aug 16[h]	9	a
Fredericton	Aug 12	Aug 17[h]	7	a
Nappan	Aug 19	Aug 18	9	a
St. John's West	Oct 31[p]	Oct 18[f]	4	a
Truro	Aug 18[p]	Aug 12[f]	12	a

D. 4TH CUT - ALFALFA

Location	Cutting date Estimated	Cutting date Observed†	Years data	Data source††
B.C.				
Kamloops	Nov 1	Oct 29[i]	2	a

Appendix 1 (Cont'd).

E. 1ST CUT - GRASS

Location	Cutting date Estimated	Cutting date Observed†	Years data	Data source††
ALBERTA				
Edmonton	Jul 4	Jul 13	5	b
Edmonton-Rochester	Jul 5[q]	Jul 12	5	b
Lethbridge	Jun 28	Jul 7[m]	4	b
Pincher Creek	Jul 10	Jul 15[em]	3	c2
Swift Current	Jun 29	Jun 24[dhm]	7	c5
ONTARIO				
Guelph	Jun 22	Jun 29	12	a
Kapuskasing	Jul 10	Jul 9	5	a
Kemptville	Jun 19	Jun 21	5	a
Ottawa	Jun 18	Jun 25	6	a
Ridgetown	Jun 14	Jun 21	3	a
Thunder Bay	Jul 9	Jul 5	4	a
ATLANTIC PROV.				
Charlottetown	Jul 6	Jul 3	10	a
Fredericton	Jun 29	Jun 27[h]	12	a
Nappan	Jul 6	Jun 30	9	a
St. John's West	Jul 27	Jul 20	4	a
Truro	Jul 5[p]	Jul 1[n]	9	a

F. 2ND CUT - GRASS

Location	Cutting date Estimated	Cutting date Observed†	Years data	Data source††
ONTARIO				
Guelph	Aug 16	Aug 13[m]	7	a
Kapuskasing	Sep 3	Sep 4[m]	5	a
Kemptville	Aug 13	Aug 6[m]	5	a
Ottawa	Aug 12	Sep 5	5	a
Ridgetown	Aug 8	Aug 13	1	a
Thunder Bay	Sep 2	Aug 15	2	a
ATLANTIC PROV.				
Charlottetown	Aug 30	Sep 2	12	a
Fredericton	Aug 23	Aug 26	15	a
Nappan	Aug 30	Aug 21	6	a
Truro	Aug 29[p]	Aug 27	10	a

† Observed average cutting dates may include more than one trial per year.

†† Data were obtained from one of three sources: a) regional variety performance trials, b) CANsis performance management file and c) scientific publications as follows: c1 Stout, 1986; c2 Lutwick and Smith, 1977; c3 Irvine and McElgunn, 1982; c4 Gasser and Lachance, 1969; c5 Kilcher and Heinrichs, 1974.

d Cutting date is based on trials with mixed stand.

e Observed date is an approximate estimate.

f Observed date is based on 2-cut system only; later dates may be observed for 1-cut systems, earlier dates for 3-cut system.

g Observed date is based on 4-cut system only; later dates are observed for 3-cut systems.

h Observed date was adjusted for maturity.

i Data based on irrigated trials.

j Climate normals data for Fergus Shand Dam, Ontario were used.

k Climate normals data for Melfort, Saskatchewan were used.

m,n Observed grass cutting dates are for bromegrass and wheatgrass respectively; all others are for timothy.

p Model estimate is adjusted about four days earlier to compensate for bias in temperature normals at the order hourly climate station at Truro, Nova Scotia.

q Estimated dates are based on average from two available climate stations closest to the trial location.

Agriculture
Canada

Direction générale
de la recherche

Research
Branch

Bulletin technique 1991-6F

Méthode de modélisation relative à l'estimation des potentiels de rendement des plantes fourragères au Canada

Canada

Méthode de modélisation relative à l'estimation des potentiels de rendement des plantes fourragères au Canada

A. BOOTSMA et J.B. BOISVERT
Centre de recherches sur les terres
Ottawa (Ontario)

Bulletin technique 1991-6F
Centre de recherches sur le terres Contribution 90-50

Direction générale de la recherche
Agriculture Canada
1991

On peut obtenir cette publication à l'adresse suivante :
Directeur
Centre de recherches sur les terres
Direction générale de la recherche, Agriculture Canada
Ottawa (Ontario)
K1A 0C6

Production du Service aux programmes de recherches

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1991
N° de cat. A54-8/1991-6F
ISBN 0-662-96669-4

Also available in English under the title
Modelling methodology for estimating forage yield potential in Canada

Illustration de la couverture
Les points sur la carte indiquent les établissements de recherches d'Agriculture Canada.

TABLE DES MATIÈRES

Page

AVANT-PROPOS 2
RÉSUMÉ 2
LISTE DES TABLEAUX 3
LISTE DES FIGURES 4
LISTE DES ANNEXES 4

1. INTRODUCTION 5
2. ÉLABORATION DU MODÈLE 6
   2.1 Choix du modèle 6
   2.2 Simulation des périodes de croissance et des calendriers de coupe 7
      2.2.1 Critères relatifs à l'estimation de la date de la première coupe 8
      2.2.2 Critères relatifs à l'estimation des dates de coupes additionnelles 10
      2.2.3 Vérification des critères relatifs aux dates de coupe 14
   2.3 Modifications additionnelles apportées au modèle de la FAO pour adaptation aux cultures fourragères 16
      2.3.1 Conditions d'exploitation du terrain 16
      2.3.2 Pertes dues à la respiration 16
      2.3.3 Indice de surface foliaire 16
      2.3.4 Début de la saison de croissance 17
      2.3.5 Bilan hydrique du sol 17
      2.3.6 Indice de récolte 18
   2.4 Simulation du rendement potentiel net en matière sèche 18
      2.4.1 Hypothèses relatives au taux maximum de croissance .. 18
      2.4.2 Validation du rendement potentiel (sans facteur limitant) 19
   2.5 Simulation des rendements prévus (sol non irrigué) en matière sèche 20
      2.5.1 Méthodes de modélisation et modifications apportées . 20
      2.5.2 Validation des rendements prévus 23
         a) Validation des rendements de luzerne et de fléole 23
         b) Validation des rendements d'agropyre 25
3. RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS 26
4. BIBLIOGRAPHIE 29
5. ANNEXE 32

AVANT-PROPOS

Les études à grande échelle sur l'évaluation des terres ont suscité un besoin d'information en ce qui a trait aux rendements des plantes fourragères, et ce besoin est à l'origine de l'élaboration du présent modèle. La culture des plantes fourragères occupe une place très importante au sein de l'ensemble des systèmes de production agricole dans presque toutes les régions du pays; il est donc nécessaire d'en tenir compte pour évaluer avec justesse les possibilités des terres et leurs aptitudes culturales. L'estimation des potentiels de production de cinq cultures annuelles a déjà fait l'objet de travaux antérieurs, mais il n'existait pas encore de modèle applicable aux plantes fourragères.

Les travaux de modélisation ont été entrepris dans le cadre d'une étude d'évaluation des terres sous la direction de M.J. Dumanski au Centre de recherches sur les terres. L'équipe affectée au projet a suivi l'évolution des travaux et proposé des plans d'action au besoin. L'objectif était d'élaborer un modèle permettant d'estimer les rendements des plantes fourragères dans toutes les régions du Canada, à l'aide des normales climatiques disponibles dans la banque de données sur les possibilités de production des terres (BDPPT). Pour les zones agroécologiques des Prairies, on a utilisé les normales climatiques relevées dans le cadre du Prairie Land Evaluation Project.

RÉSUMÉ

Ce bulletin décrit les méthodes de modélisation qui ont été mises au point dans le but d'estimer les rendements moyens potentiels (sans facteur limitant) et prévus (en sol non irrigué) des cultures fourragères au Canada. Le modèle relatif aux plantes fourragères (FORYLD) s'inspire d'un modèle général modifié sur la croissance des plantes qui a déjà été utilisé pour estimer les potentiels de production de cultures annuelles au Canada. On a mis au point des sous-programmes qui ont été confrontés aux résultats pratiques dans le but de simuler des périodes de croissance normales et des calendriers de coupe relatifs à la luzerne et aux graminées (fléole des prés, brome, agropyre). Chaque période de croissance a par la suite été considérée comme une saison de végétation complète pour les cultures annuelles dans le modèle de la FAO. En plus des calendriers de coupe, on a intégré plusieurs modifications importantes au modèle FORYLD. On a notamment modifié : i) la méthode d'estimation de l'indice de surface foliaire; ii) le rapport entre la photosynthèse foliaire maximale et la température; iii) la méthode utilisée pour déterminer le facteur de stress hydrique servant à calculer les rendements prévus à partir des rendements potentiels. Pour calibrer et valider le modèle, on a confronté les estimations de rendement fournies par ce dernier avec les rendements observés au cours d'essais en champ réalisés à divers endroits au Canada. Les résultats démontrent que l'exactitude des estimations de rendements potentiels et prévus, fournies par le modèle, est d'environ plus ou moins ± 1 t/ha.

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau 1.	Critères relatifs à l'estimation des dates moyennes de coupe de luzerne - Option 1.	12
Tableau 2.	Critères relatifs à l'estimation des dates moyennes de coupe de luzerne - Option 2.	13
Tableau 3.	Critères relatifs à l'estimation des dates moyennes de coupe des graminées.	14
Tableau 4.	Coefficients de corrélation (r) entre les dates moyennes de coupe estimées et observées - luzerne et graminées.	15
Tableau 5.	Comparaison entre les rendements potentiels moyens estimés et observés en matière sèche. Luzerne et fléole des prés.	19
Tableau 6.	Rapport entre la capacité de rétention d'eau disponible du sol et les classes texturales.	21
Tableau 7.	Comparaison entre les rendements prévus moyens - observés et estimés - en matière sèche (B_{ya}). Luzerne.	24
Tableau 8.	Comparaison entre les rendements moyens prévus - observés et estimés - en matière sèche (B_{ya}). Fléole des prés.	24
Tableau 9.	Comparaison entre les rendements moyens prévus - observés et estimés - en matière sèche (B_{ya}). Agropyre à crête.	27
Tableau 10.	Comparaison entre les rendements moyens prévus - observés et estimés - en matière sèche (B_{ya}). Agropyre intermédiaire.	27

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.	Taux de développement relatif (TDR) en fonction de la photopériode ou de la longueur des jours (P).	9
Figure 2.	Rapport entre la moyenne des températures moyennes quotidiennes de l'air et la variable JOURS utilisée dans le choix des critères relatifs aux dates de coupe de luzerne.	10
Figure 3.	Comparaison entre les dates moyennes de coupe estimées et les dates observées (jour de calendrier) - jusqu'à quatre coupes de luzerne et deux coupes de graminées.	15
Figure 4.	Rapport entre le rendement photosynthétique foliaire maximum (P_m) et la température moyenne au cours de la journée (T_{mdt}).	18
Figure 5.	Rapport entre le facteur de stress hydrique (SH) et le déficit-surplus hydrique du sol (DSHS).	22
Figure 6.	Comparaison entre les rendements prévus moyens en matière sèche-estimés et observés - de toutes les coupes de luzerne (deux-trois coupes).	25

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1.	Dates moyennes de coupe observées et estimées utilisées pour vérifier les critères relatifs aux dates de coupe - luzerne et graminées.	32

1. INTRODUCTION

L'utilisation de modèles informatisés, relatifs à la croissance et au rendement des cultures, en vue d'estimer les potentiels de production de ces dernières à partir d'informations climatiques et pédologiques n'est pas un nouveau concept. En 1978, l'Organisation des Nations-Unies pour l'agriculture et l'alimentation (FAO) a publié des méthodes visant à évaluer les potentiels de production de onze cultures dans des pays en voie de développement (FAO, 1978). Les méthodes de la FAO permettent l'estimation de potentiels de rendement sans facteur limitant à partir de régimes de température et de rayonnement ainsi que la prévision de potentiels de rendement en sol non irrigué en tenant compte du stress hydrique et d'autres facteurs limitants. Les méthodes utilisées pour mesurer les effets du stress hydrique sur le rendement sont celles de Doorenbos et Kassam (1979). Les méthodes de la FAO ont par la suite été adaptées en vue d'estimer le potentiel de production de cinq cultures annuelles au Canada (Dumanski et Stewart, 1983; Stewart, 1983). Les estimations de rendement et de potentiel de production ont été réalisées pour 775 zones pédologiques figurant sur la carte des sols du Canada (Clayton et al., 1977) à l'aide des données climatiques et pédologiques de chaque unité cartographique. Les renseignements sur les sols, le climat et les rendements potentiels des cultures, utilisés comme données de base ou provenant de ces études, ont été intégrés depuis à la banque de données sur les possibilités de production des terres (Land Potential Data Base) (Kirkwood et al., 1989).

Jusqu'à maintenant, les études sur les potentiels de production des terres du Canada ont surtout porté sur les cultures annuelles. Il s'avère cependant utile de mettre au point des méthodes visant à évaluer les potentiels de production des plantes fourragères vivaces, étant donné que ces dernières occupent une place importante au sein des systèmes de production agricole au Canada. De telles évaluations sont nécessaires à d'autres secteurs d'activités, tels que la planification de l'utilisation des terres, les décisions relatives à la régie des cultures, l'élaboration des politiques, les programmes d'assurance-récolte, la planification et l'évaluation de la recherche agricole, etc.

Ce bulletin vise à décrire les méthodes de modélisation servant à estimer les potentiels de rendement des plantes fourragères au Canada, à partir de données climatiques et pédologiques. Les fondements des méthodes de modélisation ont déjà été traités (Stewart, 1983) et ne seront donc que résumés brièvement. Le présent document traite principalement des modifications apportées aux méthodes existantes pour les plantes fourragères.

De nombreuses espèces et variétés de plantes fourragères sont cultivées au Canada. Afin d'utiliser les ressources existantes, les auteurs ont principalement tenté de simuler les rendements de plusieurs espèces de légumineuses et de graminées les plus couramment cultivées, notamment la luzerne, la fléole des prés (pour les régions humides), l'agropyre à crête et l'agropyre intermédiaire (pour les régions plus sèches des prairies). C'est également sur ces espèces qu'il y a le plus d'informations provenant d'essais réalisés à suffisamment d'endroits pour permettre de calibrer et vérifier le

modèle. L'accent a été mis sur l'estimation des potentiels de rendement à long terme calculée à partir des normales climatiques plutôt que sur la prévision des rendements sur une base annuelle.

Les rendements des plantes fourragères sont fréquemment influencés par divers facteurs tels que la persistance des cultures et les dommages hivernaux, particulièrement dans le cas de la luzerne. Toutefois, le manque de données et de ressources n'a pas permis, à cette étape, d'intégrer ces paramètres dans le modèle. Par conséquent, les efforts ont surtout porté sur l'estimation des potentiels de rendements moyens des plantes fourragères au cours des premières années suivant l'établissement des cultures, en supposant que les dommages hivernaux ne réduisaient pas les rendements. Il faudra beaucoup d'autres recherches et de données expérimentales si l'on veut éventuellement intégrer ces paramètres.

2. ÉLABORATION DU MODÈLE

2.1 Choix du modèle

Pour élaborer un modèle applicable aux plantes fourragères qui permet d'estimer les potentiels de rendements moyens au Canada, les auteurs ont choisi de modifier le modèle existant de la FAO adapté aux conditions canadiennes par Stewart (1983) (ci-après désigné comme le modèle de la FAO). Ce choix repose sur les motifs suivants : 1) l'accessibilité au logiciel du modèle existant; 2) l'accessibilité aux données climatiques et pédologiques grâce à la banque de données sur les possibilités de production des terres (Kirkwood et al., 1989); 3) adaptation avec succès par d'autres chercheurs du modèle de la FAO pour estimer les rendements annuels des cultures fourragères (McBride et Brown, 1984); 4) évaluation par le modèle à la fois des rendements potentiels sans facteur limitant et sans stress hydrique et des rendements prévus en sol non irrigué.

Le modèle de la FAO permet d'estimer la production nette de biomasse (B_N) en utilisant l'équation suivante :

$$B_N = 0{,}36\ b_{gm} / (1/N + 0{,}25\ C_t) \qquad (1)$$

où b_{gm} désigne le taux maximum de production de biomasse ($kg.ha^{-1}.jr^{-1}$) sous pleine couverture végétale (indice de surface foliaire supérieur ou égal à 5).

N : durée de la saison de croissance (en jours)
C_t : respiration d'entretien fonction de la température moyenne de l'air.

b_{gm} est déterminé par la méthode de DeWit (1965) en utilisant les estimations du taux maximum de production de biomasse les jours ensoleillés et les jours couverts. La moyenne saisonnière d'heures d'ensoleillement lorsque le ciel est couvert est calculée à partir du rayonnement solaire global. La variable b_{gm} dépend aussi du taux maximum de photosynthèse foliaire lequel

est fonction de l'espèce cultivée et de la température. L'équation (1) suppose que la croissance potentielle cumulée suit une courbe sigmoidale idéale lorsque les conditions sont optimales. On doit par ailleurs apporter une correction à la production nette de biomasse sans facteur limitant lorsque l'indice de surface foliaire (LAI) de la culture est inférieur à 5,0.

On détermine le rendement potentiel net en matière sèche (B_y) en tenant compte de l'indice de récolte (H_i) de la manière suivante :

$$B_y = B_N \times H_i \qquad (2)$$

où H_i représente la fraction de la production nette de biomasse qui est utile économiquement. B_y représente donc le rendement potentiel atteignable lorsque l'humidité, l'apport nutritif, les mauvaises herbes, les insectes nuisibles et les maladies ne limitent pas la croissance des plantes.

Le rendement prévu (B_{ya}) est le rendement récoltable obtenu après avoir tenu compte des réductions imputables aux conditions d'exploitation du terrain (pertes au cours de la récolte) et au stress hydrique. Selon le modèle de la FAO, on le calcule de la manière suivante :

$$B_{ya} = B_y \times SH \times W \qquad (3)$$

où SH représente le stress hydrique et W les conditions d'exploitation du terrain.

Dans le modèle de la FAO, le facteur de stress hydrique est calculé à partir du rapport de l'évapotranspiration réelle (ET) sur l'évapotranspiration potentielle (ETP), en ayant recours à un facteur de comportement du rendement (K_y) dérivé de manière empirique, d'après Doorenbos et Kassam (1879) c'est-à-dire :

$$SH = 1 - K_y (1 - ET/ETP) \qquad (4)$$

L'ET et l'ETP sont des moyennes saisonnières déterminées à partir d'une méthode de bilan hydrique du sol. Le paramètre représentant les conditions d'exploitation du terrain a été estimé à partir de probabilités sur les journées de travail automnales. Les propos qui suivent porteront surtout sur les modifications apportées au modèle de la FAO pour les cultures fourragères. Afin de faciliter la lecture, le modèle modifié applicable aux plantes fourragères sera dorénavant désigné par l'acronyme FORYLD.

2.2 Simulation des périodes de croissance et des calendriers de coupe

Le modèle de la FAO pour le Canada a été établi en vue d'estimer les rendements potentiels moyens des cultures annuelles pour une saison de croissance moyenne dont la durée est déterminée par la température. Dans le cas des plantes fourragères, on peut généralement observer plusieurs périodes de croissance et de récolte au cours d'une saison de végétation. On a donc mis au point des sous-programmes en vue de simuler des périodes moyennes de

croissance et des dates de récolte à partir des normales climatiques pour les légumineuses (luzerne) et les graminées (fléole des prés, agropyre). Chaque période de croissance a été par la suite traitée comme une saison complète de végétation dans FORYLD.

2.2.1 Critères relatifs à l'estimation de la date de la première coupe

L'estimation des dates moyennes de première coupe pour les légumineuses et les graminées a été établie à partir des unités photothermiques cumulées (UPT). Les UPT ont été définies comme les degrés-jours de croissance cumulés au-dessus d'une température minimale de 5 °C (DJC) et modifiés par un facteur exprimant la longueur du jour. Des études antérieures ont démontré que les DJC cumulés peuvent servir à prévoir les dates de maturité dans certaines régions géographiques (Bootsma, 1984; Harcourt, 1984). À l'échelle canadienne, cependant, la longueur des jours peut varier de façon significative, modifiant ainsi le rythme de développement et la date de maturité de certaines espèces de plantes fourragères. Une étude documentaire sur la question a démontré que l'influence de la longueur des jours sur le taux de développement peut varier considérablement selon les espèces et les variétés de plantes fourragères. Toutefois, pour un grand nombre des espèces les plus courantes de graminées et de légumineuses (ex. : fléole des prés, brome, luzerne, trèfle), les jours longs favorisent l'épiaison ou la floraison, alors que les jours courts retardent la floraison et peuvent même l'inhiber complètement (Evans et Allard, 1934; Allard et Evans, 1941; Evans et Wilsie, 1946; Ludwig et al., 1953; de Ruiter et Taylor, 1979). En raison de ce constat, on a privilégié une approche empirique afin d'inclure l'influence de la longueur des jours dans le modèle FORYLD, en ayant recours au concept du taux de développement relatif (TDR). La figure 1 illustre la relation existant entre le TDR et la longueur des jours ou la photopériode (P) dont l'approximation mathématique se calcule ainsi :

$$TDR = -0,37 + 0,1626\ (P) - 0,005942\ (P^2) + 0,000062217\ (P^3) \qquad (5)$$

Les UPT quotidiennes ont été calculées à partir des DJC multipliés par le TDR :

$$\text{UPT quotidiennes} = (T_{mn} - 5,0) \times TDR \qquad (6)$$

où T_{mn} représente la moyenne des températures normales quotidiennes au cours d'une période de 30 ans (1951-1980).

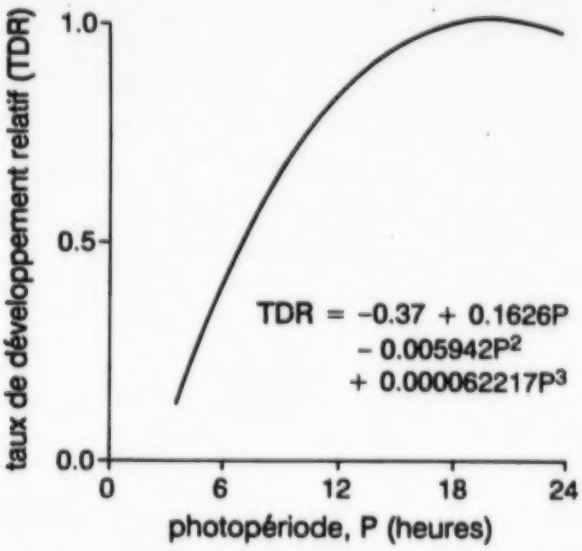

Figure 1. Taux de développement relatif (TDR) en fonction de la photopériode ou de la longueur des jours (P).

On a calculé le nombre d'UPT qui devaient être atteintes avant la première coupe en cumulant les UPT moyennes quotidiennes (à l'aide des températures normales entre 1951 et 1980) à partir de la date où la T_{mn} est supérieure ou égale à 5 °C au printemps jusqu'à la date moyenne de la première coupe de luzerne à 26 endroits au Canada. Les dates moyennes de coupe ont été déterminées à partir de rapports sur les essais de variétés de plantes fourragères réalisés par divers collaborateurs de l'Ouest du Canada, de l'Ontario et des provinces de l'Atlantique (ex. : Ontario Forage Crops Committee, 1968; Comité de l'Atlantique sur les cultures, 1982; Comité d'experts sur les plantes fourragères, 1983). Les dates moyennes de coupe observées étaient basées sur les données de ces rapports régionaux; les données en question ont été recueillies au cours d'essais variant de deux à plus de dix ans. On a démontré, à l'aide de cette méthode, que la luzerne exige environ 480 UPT pour atteindre la maturité à la première coupe. On a supposé que les récoltes au cours des essais régionaux étaient effectuées environ au moment où les variétés de luzerne hâtives et semi-hâtives atteignaient le stade de la première floraison. Certaines variétés peuvent avoir besoin de plus ou moins 480 UPT pour la première coupe, mais on n'a pas tenu compte de ces variations dans le modèle FORYLD. Puisque la luzerne est souvent cultivée en association avec la fléole des prés ou le brome, on a supposé que les espèces de graminées exigeaient le même nombre d'UPT cumulées.

On a également prêté différentes valeurs au TDR, analogues à celles qui sont mentionnées à la figure 1 (y compris une valeur constante du TDR égale à 1,0, pour laquelle les UPT et les DJC étaient égaux), et sur lesquelles la photopériode exercerait une influence plus ou moins grande. Les résultats ont démontré qu'on pouvait obtenir des estimations valables avec diverses fonctions, y compris les DJC, et que le choix de la fonction n'était donc pas

déterminant. Toutefois, la fonction illustrée à la figure 1 a été choisie parce qu'elle permet d'obtenir le plus faible écart type (3 à 4 jours) en ce qui a trait à la différence entre la moyenne estimatée et la moyenne observée des dates de coupe à 26 sites expérimentaux.

Les latitudes des sites expérimentaux ayant fait l'objet des essais sur les dates de coupe s'étalaient de la limite sud, de Ridgetown, Ontario (42°N) à la limite nord de Fort Vermilion, Alberta (58°N). Cette gamme étendue offrait une grande variété dans la longueur des jours (15 à 18 heures, respectivement, au 23 juin). On a également tenu compte de l'influence de la période de l'année sur la longueur des jours en ayant recours au concept des UPT. Les sites où le printemps est tardif en raison des températures fraîches connaissent généralement des jours plus longs au cours de la première période de croissance que les autres sites de même latitude où le réchauffement printanier se fait plus hâtivement.

2.2.2 Critères relatifs à l'estimation des dates de coupes additionnelles

Les critères servant à établir le calendrier des dates de coupe additionnelles ont été déterminés à partir des données existantes sur les dates de coupe recueillies dans le cadre d'essais régionaux sur les variétés de luzerne, de fléole des prés et de brome. Dans le cas de la luzerne, les

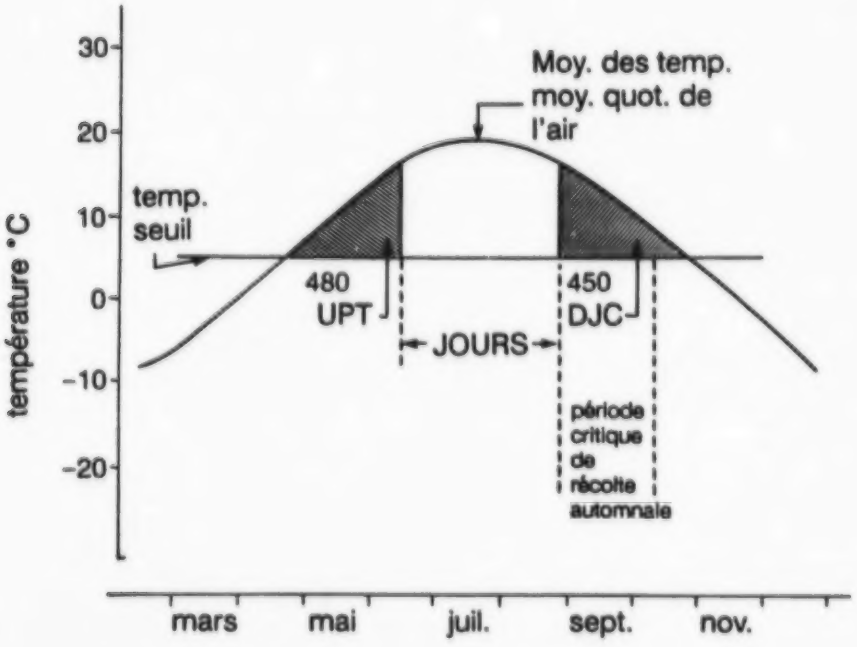

Figure 2. Rapport entre la moyenne des températures moyennes quotidiennes de l'air et la variable JOURS utilisée dans le choix des critères relatifs aux dates de coupe de luzerne.

dates de coupe dépendent d'abord du nombre de jours (JOURS) compris entre la date de la première coupe et le début de la période critique de récolte automnale (J_{450}) (voir fig. 2). Normalement, la luzerne ne doit pas être récoltée pendant la période critique des 4 à 6 semaines précédant un gel meurtrier, afin que les racines puissent accumuler suffisamment de réserves nutritives réduisant ainsi les risques de dommages hivernaux (Woolley et Wilsie, 1961; Fulkerson, 1970). Le début de la période automnale critique a été fixé à la date moyenne à partir de laquelle il ne reste que 450 DJC à accumuler pendant l'automne (Bootsma et Suzuki, 1985).

Tableau 1. Critères relatifs à l'estimation des dates moyennes de coupe de luzerne - Option 1

JOURS†	Nbre de coupes	Critères -dates de coupe			
		1re coupe	2e coupe	3e coupe	4e coupe
<0	0-1	480 UPT (pas de coupe si a lieu 42 jrs avant la FSC††)	-	-	-
0-21	1-2	480 UPT	Facult. à la FSC		-
22-43	2	480 UPT	La 1re des dates suiv. : a) 15 jrs après J_{450} b) 44 jrs après 1re coupe		
44-55	2-3	480 UPT	44 jrs après 1re coupe	Facult. à la FSC	-
56-59	3	480 UPT	44 jrs après 1re coupe	FSC	
60-79	3	480 UPT	La dern. des dates suiv. : a) (JOURS)/2 après 1re coupe b) 32 jrs. après 1re coupe	La dern. des dates suiv. : a) (JOURS)/2 après 2e coupe b) 32 jrs. après 2e ccupe	
≥80	3-4	480 UPT	(JOURS-10)/2 après 1re coupe	(JOURS-10)/2 après 2e coupe	Facult. à la FSE

† Nombre de jours entre la date à partir de laquelle 480 UPT ont été cumulées au printemps jusqu'à la date où il ne reste que 450 DJC à accumuler.

†† FSC signifie la fin de la saison de croissance, soit la date à laquelle la moyenne de la température quotidienne de l'air descend pour la première fois à 5 °C ou plus bas à l'automne. Dans le présent modèle, le nombre maximum de jours de croissance pour une coupe réalisée à la fin de la saison de croissance est de 60 jours, c'est-à-dire qu'il n'y a plus d'accumulation de matière sèche après 60 jours même si la récolte est retardée jusqu'à la FSC.

La recommandation à l'effet qu'on doit éviter de faire les récoltes durant la période critique demeure encore quelque peu controversée. Les récoltes peuvent se faire relativement sans risque durant cette période si les dommages hivernaux ne posent habituellement pas de problèmes ou si la fréquence des coupes n'est pas trop élevée. Des données expérimentales recueillies à Kamloops, C.-B. (Stout, 1986) laissent supposer qu'il est plus déterminant pour maintenir la vigueur de la parcelle d'espacer suffisamment l'intervalle entre les coupes que d'éviter de récolter durant la traditionnelle période critique établie pour la région.

Étant donné qu'on peut récolter la luzerne selon divers calendriers de coupe avec des résultats comparables, on a mis au point deux séries de critères à cet effet (option 1 et option 2 - voir tableaux 1 et 2). L'option 1 comprend les principaux critères utilisés dans le modèle FORYLD. Toutefois,

Tableau 2. Critères relatifs à l'estimation des dates moyennes de coupe de luzerne - Option 2 (seulement si différente de l'option 1).

		Critères-dates de coupe		
JOURS	coupes	1re	2e	3e
22-29	2	480 UPT	FSC	-
35-43	2-3	480 UPT	J_{450}	FSC optionnel
60-79	3	480 UPT	55 jours après la 1re coupe	FSC
≥80	3	480 UPT	(JOURS+5) 2 jours après la 1re coupe	(JOURS+5) 2 jours après la 1re coupe

pour des valeurs choisies des variables JOURS, on applique aussi une deuxième option (tableau 2). Si la dernière coupe est facultative, cela signifie que cette dernière peut être effectuée sans risque uniquement si les dommages hivernaux ne posent pas de problèmes. Dans le cas contraire, on peut améliorer la survie de la parcelle en laissant une culture d'automne qui permettra de retenir la neige et d'offrir ainsi une protection supplémentaire.

Les critères relatifs aux dates de coupe des graminées (tableau 3) sont établis d'après le nombre de jours entre la première coupe et la date à laquelle il ne reste que 400 DJC à l'automne (J_{400}). Les graminées étant plus rustiques que la luzerne, on se préoccupe moins d'éviter les récoltes au cours de la période critique automnale.

Tableau 3. Critères relatifs à l'estimation des dates de coupe des graminées.

		Critères-dates de coupe		
JOURS†	coupes	1re	2e	3e
≤25	0-2	480 UPT*	Facult. 55 jrs après 1re coupe*	-
≥25	2-3	480 UPT	55 jrs après 1re coupe	Facult. 55 jrs. après 2e coupe*

† Nombre de jours entre la date à laquelle 480 UPT ont été accumulées au printemps jusqu'à J_{400}.

* On ne peut effectuer de coupe à moins de 30 jours de la fin de la saison de croissance.

2.2.3 Vérification des critères relatifs aux dates de coupe

Les critères relatifs aux dates de coupe de luzerne et de graminées (fléole des prés, brome et agropyre) ont été vérifiés en comparant les dates moyennes estimées selon les critères figurant aux tableaux 1 et 3, avec les dates moyennes de coupe observées à divers endroits (annexe 1). Les données observées proviennent de trois sources : a) essais sur les rendements de diverses variétés réalisés un peu partout au Canada (ex. : Ontario Forage Crops Committee, 1968; Comité de l'Atlantique sur les cultures, 1982; Comité d'experts sur les plantes fourragères, 1983); b) dossier sur la gestion des rendements de SIScan du Centre de recherches sur les terres, Agriculture Canada (communication personnelle de M. K.B. MacDonald); c) divers articles scientifiques. Une grande partie des données provenant des essais régionaux sur les rendements ont également servi à l'établissement des critères et, par conséquent, cette vérification n'est pas rigoureusement indépendante.

Les corrélations entre les dates moyennes de coupe estimées et les dates observées étaient élevées (r >0,83) pour chacune des trois coupes de luzerne et la première coupe de graminées (tableau 4). Il était prévisible que la corrélation soit plus faible dans le cas de la deuxième coupe de graminées puisque la période critique de récolte automnale n'est généralement pas importante pour les graminées rustiques, ce qui offre plus de souplesse pour la planification des récoltes. Les coefficients de corrélation pour l'ensemble des coupes étaient très élevés (r $\geq$0,96) puisque les dates de coupe sont aussi dépendantes de la fonction temps.

Tableau 4. Coefficients de corrélation (r) entre les dates moyennes de coupe estimées et observées - luzerne et graminées.

Culture	Coupe	Nombre de cas	r
Luzerne	1	44	0,92
Luzerne	2	28	0,95
Luzerne	3	8	0,98
Luzerne	1-4	81	0,99
Graminées	1	16	0,83
Graminées	2	10	0,41
Graminées	1-2	26	0,96

Les relations linéaires entre les dates de coupe estimées et les dates observées sont illustrées graphiquement à la figure 3. Ces essais démontrent que les critères relatifs aux dates de coupe indiqués aux tableaux 1 et 3 conviennent généralement à la luzerne et aux graminées.

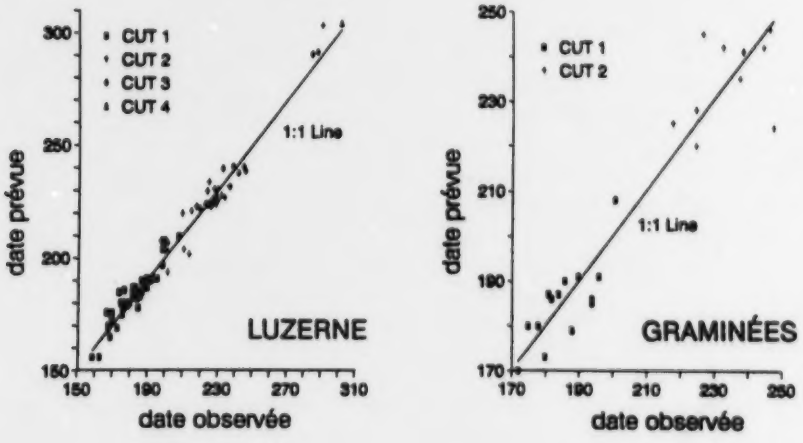

Figure 3. Comparaison entre les dates moyennes de coupe estimées et les dates observées (jour de calendrier) - jusqu'à quatre coupes de luzerne et deux coupes de graminées.

Cette vérification n'est cependant pas rigoureuse puisque : a) certaines observations ayant servi à l'établissement de dates moyennes de coupe proviennent de données recueillies pendant relativement peu d'années; b) on a souvent omis de noter le stade de maturité des plantes au moment de la coupe lequel peut varier, et c) les stations climatiques en question n'étaient peut-être pas toujours représentatives du site expérimental.

Par ailleurs, les données étaient insuffisantes pour permettre de vérifier statistiquement l'option 2 (tableau 2). Les cas sont toutefois assez nombreux pour laisser croire que cette option est une alternative valable sous certaines conditions.

2.3 Modifications additionnelles apportées au modèle de la FAO pour adaptation aux cultures fourragères

2.3.1 Conditions d'exploitation du terrain

Le manque d'informations pertinentes n'a pas permis d'évaluer les pertes durant la récolte en vue d'inclure ce facteur dans le modèle FORYLD. Les conditions d'exploitation du terrain dans le modèle de la FAO (Stewart, 1983) sont évaluées en fonction de l'humidité du sol pendant la période de récolte automnale. Hors, dans le cas des plantes fourragères, les pertes durant la récolte dépendent davantage des conditions qui prévalent au-dessus du sol (précipitation et évaporation) que de l'humidité du sol comme tel. Ce paramètre a donc été fixé à 1,0.

2.3.2 Pertes dues à la respiration

Dans le modèle de la FAO, la respiration d'entretien C_t se calcule de la manière suivante :

$$C_t = C_{30} (0{,}044 + 0{,}0019T + 0{,}0010T^2) \qquad (7)$$

où C_{30} représente le coefficient de respiration d'entretien à 30 °C et T représente la température moyenne de l'air au cours de la saison de croissance. Dans le modèle FORYLD, les valeurs attribuées à C_{30} pour la luzerne et les graminées sont respectivement de 0,0283 et 0,0108 (soit les valeurs utilisées pour les légumineuses et les autres cultures dans le modèle de la FAO).

2.3.3 Indice de surface foliaire (LAI)

Le taux de croissance maximum de la culture utilisé dans le modèle de la FAO a été corrigé lorsque le LAI maximum était inférieur à 5,0 (Stewart, 1983). Cette correction influence directement la valeur de la production nette de biomasse sans facteur limitant (B_N) dans l'équation (1). Le LAI a également été utilisé pour répartir l'évaporation totale en deux paramètres, soit l'évaporation au sol sans couvert végétal et la transpiration de la plante. Dans le modèle de la FAO, les valeurs quotidiennes du LAI ont été simulées à partir de la progression durant la saison de croissance et en fonction des courbes LAI relatives aux cultures annuelles. Il a cependant été

démontré que ces courbes sous-estimaient l'indice type de surface foliaire relatif aux cultures vivaces qui est signalé dans les travaux antérieurs (Hunt et al., 1970; Carter et Sheaffer, 1983). Les méthodes utilisées pour estimer le LAI de la luzerne dans le modèle FORYLD sont basées sur les courbes types de LAI mentionnées dans la bibliographie. On a attribué une valeur de 6,5 au LAI maximum pour la première coupe et de 6,0 pour les deuxième et troisième coupes. Lorsque la dernière coupe a lieu à la fin de la saison de croissance, on attribue une valeur de 4,5 au LAI maximum. Le LAI maximum ne peut être atteint qu'après une période de croissance supérieure à 45 jours. Lorsque la durée de la saison de croissance (DSC) est égale ou inférieure à 45 jours, le LAI est calculé de la manière suivante:

$$LAI = LAI\ maximum \times DSC/DSC\ max. \qquad (8)$$

où le LAI maximum est tel que mentionné plus haut et la DSC maximum est de 45 jours.

Dans le cas des graminées, le LAI maximum est établi à 6,0 pour la première coupe et à 4,0 pour les coupes subséquentes. La DSC maximale a été établie à 55 jours.

2.3.4 Début de la saison de croissance

Le modèle de la FAO suppose que le début de la saison de croissance des cultures annuelles correspond au jour où la température minimum moyenne quotidienne de l'air dépasse 5 °C (Stewart, 1983). La saison de croissance pour les plantes fourragères vivaces est plus longue; dans le modèle FORYLD, on suppose que le début de la saison coïncide avec le jour où la température quotidienne moyenne de l'air (au cours de la saison de croissance) (T_{MN}) dépasse 5 °C (Chapman et Brown, 1966). La première période de croissance a commencé au début de la saison de croissance et s'est terminée après la première récolte. Les périodes de croissances pour les pousses subséquentes ont débuté le premier jour suivant la coupe et se sont terminées le jour de la récolte.

2.3.5 Bilan hydrique du sol

Dans le modèle FORYLD, le calcul du bilan hydrique commence au printemps (au début de la saison de croissance en terme d'humidité) (Stewart, 1983) lorsque la moyenne de l'évapotranspiration potentielle (ETP) quotidienne dépasse pour la première fois la précipitation quotidienne moyenne (P) ou le premier jour où la T_{MN} est supérieure à 5 °C, selon l'événement qui se produit en dernier. La dernière date coïncide presque avec le moment où la profondeur moyenne de la couche de neige est inférieure à 2,5 cm pendant sept jours consécutifs, comme il est mentionné dans l'Atlas hydrologique du Canada (Pêches et Environnement Canada, 1978). Par conséquent, on a supposé que la surface du sol est dégelée et que l'évaporation se fait normalement après cette date.

2.3.6 Indice de récolte

Une valeur de 0,95 a été attribuée à l'indice de récolte (H_i) dans le modèle FORYLD, ce qui signifie que presque toute la production nette de biomasse pouvait être récoltée. On a supposé que les chaumes non récoltés et les résidus ne représentaient qu'un faible pourcentage (5 %).

2.4 Simulation du rendement potentiel net en matière sèche

2.4.1 Hypothèses relatives aux taux maximum de croissance

La production nette de biomasse sans facteur limitant (B_N) est fonction du b_{gm}, c'est-à-dire du taux maximum de production brute de biomasse (éq. 1). D'autre part, b_{gm} est influencé par le taux de production de biomasse les jours ensoleillés et couverts ainsi que par la portion de la journée où le ciel est couvert (Stewart, 1983). Par la suite, une correction est apportée au b_{gm}, selon le rendement photosynthétique foliaire maximum (P_m), lequel dépend de la température saisonnière moyenne pendant la journée (T_{mdt}) et de l'espèce cultivée. McBride et Brown (1984) ont calibré des courbes du rendement photosynthétique (P_m) par rapport à T_{mdt} pour six espèces de plantes fourragères (cultures C_3) en ayant recours à des données provenant d'essais sur des variétés de fourragères réalisés en Ontario. Les courbes relatives à la luzerne semi-hâtive et à la fléole des prés qui ont été intégrées dans le modèle FORYLD proviennent de McBride et Brown (1984) et se calculent comme suit :

luzerne :

$$P_m = -57,6446 + 8,2645\ T_{mdt} - 0,2066\ (T_{mdt})^2 \qquad (9)$$

graminées :

$$P_m = 3,0667\ T_{mdt} - 0,1022\ (T_{mdt})^2 \qquad (10)$$

Ces équations sont comparées avec la courbe P_m vs T_{mdt} utilisées pour les cultures C_3 dans le modèle de la FAO (fig. 4).

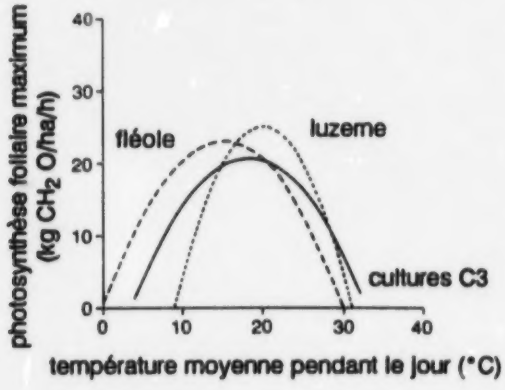

Figure 4. Rapport entre le rendement photosynthétique foliaire maximum (P_m) et la température moyenne au cours de la journée (T_{mdt}).

2.4.2 Validation du rendement potentiel (sans facteur limitant)

Les estimations du rendement potentiel des plantes fourragères sans stress hydrique (B_y, éq. 2) ont été comparées avec les rendements observés sur des sites d'essais régionaux de variétés à des endroits choisis au Canada (tableau 5). On a sélectionné les données obtenues au cours de plusieurs années et présentant les rendements les plus élevés, en supposant que le stress hydrique était nul ou faible ces années-là. Toutefois, étant donné qu'un certain stress peut survenir en raison de déficit hydrique même pendant les meilleures saisons, les rendements observés ne sont donc que des approximations du rendement potentiel. Des méthodes de gestion, tels que l'application d'engrais et les dates de récolte peuvent également influencer les rendements observés. Dans l'Ouest canadien, les rendements observés proviennent des données recueillies au cours d'essais en sol irrigué. Pour chaque année ayant fait l'objet d'essais, on a déterminé le rendement en faisant la moyenne des données relatives à des variétés standard sélectionnées. L'influence de l'âge des parcelles sur les rendements a été minimisée car on n'a utilisé que les données recueillies au cours des trois premières années suivant l'établissement.

Tableau 5. Comparaison entre les rendements potentiels moyens en matière sèche, estimés (EST) et observés (OBS) - a) luzerne et b) fléole des prés.

	Rendement en mat. sèche (t/ha) et rapp. des années d'essai										
Endroit	1re coupe			2e coupe			3e coupe			Total	
	EST	OBS	n/N†	EST	OBS	n/N	EST	OBS	n/N	EST	OBS
a) Luzerne											
Kamloops, C.-B.††	8,5	5,6	2/10	4,9	5,2	3/10	3,9	3,7	3/10	17,3	14,5
Swift Current, Sask.††	9,1	9,5	4/13	5,8	5,5	4/13	-	-	-	14,9	15,0
Ridgetown, Ont.	8,0	7,5	4/19	4,6	6,2	2/19	4,2	3,8	4/19	16,8	17,5
Ottawa, Ont.	8,0	6,8	3/12	4,4	3,7	2/12	4,0	3,6	1/12	16,4	14,1
Charlottetown, I.-P.-É.	8,3	7,7	2/8	5,2	5,0	1/8	-	-	-	13,5	12,7
Moyenne :	8,4	7,4		5,0	5,1		4,0	3,7		15,8	14,8
b) Fléole des prés											
Ridgetown, Ont.	8,9	8,3	2/11	4,7	4,2	2/10	-	-	-	13,6	12,5
Ottawa, Ont.	8,6	7,8	3/19	5,0	5,0	2/15	-	-	-	13,6	12,8
Kapuskasing, Ont.	9,3	6,8	2/16	5,7	4,9	2/16	-	-	-	15,0	11,7
Truro, N.-É.	9,8	8,7	2/14	5,6	3,4	2/11	-	-	-	14,9	12,1
Charlottetown, I.-P.-É.	9,4	8,9	3/17	5,5	4,2	3/16	-	-	-	14,5	12,4
Moyenne :	9,2	8,1		5,3	4,3		-	-	-	14,5	12,4

† n représente le nombre d'années pour lesquelles on a recueilli les données (rendements élevés) utilisées pour calculer les valeurs OBS; N représente le nombre total d'années pour lesquelles il existait des données sur les rendements.

†† Les données sur les rendements proviennent d'essais sur les variétés réalisés en sol irrigués à ces endroits.

Les rendements potentiels en matière sèche estimés à partir du modèle FORYLD ont été, en moyenne, supérieurs d'environ 1 t/ha aux rendements observés (tableau 5). A plusieurs endroits, les rendements prévus étaient de 3 t/ha plus élevés que les valeurs observées (ex. : la première coupe de luzerne à Kamloops; la première coupe de fléole à Kapuskasing). Les faibles rendements observés à ces endroits sont probablement attribuables à des niveaux de gestion non optimum ou au stress hydrique. Dans plusieurs cas, les estimations du modèle étaient inférieures aux rendements observés (ex. : la deuxième coupe de luzerne à Ridgetown). Cette situation peut s'expliquer par les différences entre la durée de la période de croissance ayant servi au modèle et celle qui a prévalu dans le cadre des essais. On peut également l'attribuer à des températures moyennes ou au rayonnement solaire supérieurs à la normale au cours de la période de croissance. Toutefois, étant donné que les estimations du modèle étaient basées sur des normales à long terme, il n'a pas été possible de déterminer avec certitude les raisons justifiant les différences de rendement.

Les rendements potentiels estimés en matière sèche ont été comparés avec les valeurs observées à d'autres endroits non mentionnés au tableau 5. Dans la plupart des cas, les rendements observés étaient inférieurs aux valeurs estimées. Les différences les plus importantes ont été observées dans le cas des premières coupes de luzerne, pour lesquelles les rendements potentiels observés étaient généralement inférieurs de 2 à 3 t/ha aux rendements estimés. Il est probable que, même au cours des meilleures années, les plantes fourragères cultivées dans le cadre d'essais de rendement régionaux ne fournissent pas toujours le rendement potentiel maximum en raison de pratiques de gestion non optimales (c.-à-d. la fertilité), du stress hydrique et des dommages causés par l'hiver.

Globalement, le modèle semble offrir des estimations valables du rendement potentiel (sans facteur limitant) des plantes fourragères. Les essais comparatifs ne constituent qu'un indicateur général et non une vérification rigoureuse du modèle. Les différences de rendements potentiels estimés de chacune des coupes entre les divers sites d'essais sont relativement faibles. Ces résultats étaient prévisibles étant donné que les rendements potentiels ne sont qu'influencés par la température, le rayonnement solaire et la durée de la période de croissance et non par l'apport d'humidité. Le rendement potentiel est principalement fonction du nombre de coupes de plantes fourragères réalisables à un endroit donné.

2.5 Simulation des rendements prévus (sol non irrigué) en matière sèche

2.5.1 Méthodes de modélisation et modifications apportées

Dans le modèle de la FAO, les rendements prévus en matière sèche (sol non irrigué) (B_{ya}) sont estimés en réduisant les rendements potentiels (B_y) par un facteur de stress hydrique (SH) calculé à partir du rapport ET/ETP (voir section 2.1, éq. 3 et 4). Les rendements estimés à l'aide du facteur de stress hydrique calculé selon les méthodes de la FAO ont été comparés avec les rendements moyens observés au cours d'essais régionaux sur les rendements de variétés, réalisés à seize endroits au Canada dans le cas

des deuxièmes coupes de luzerne et à neuf endroits dans le cas des deux coupes de fléole. On a supposé que le facteur de comportement du rendement (K_y) était respectivement de 1,0 et 1,1 pour la luzerne et la fléole. La capacité de rétention d'eau disponible a été estimée à partir des classes texturales tirées de rapports d'essais ou communiquées directement par des collaborateurs. Le rapport entre la granulométrie du sol et la capacité de rétention d'eau disponible est tiré des travaux de DeJong et Shields (1988) et figure au tableau 6.

L'application directe de ces correspondances au modèle modifié de la FAO n'a cependant pas donné de résultats satisfaisants. Les rendements des plantes fourragères ont été surestimés en moyenne d'environ 70 % et 26 % respectivement pour les deux premières coupes de luzerne et d'environ 40 % et 70 % respectivement pour les deux premières coupes de fléole. Les estimations

Tableau 6. Rapport entre la capacité de rétention d'eau disponible du sol et les classes texturales (source : DeJong et Shields, 1988).

Cap.rét.eau disp. (mm)	Classes texturales
50	sable; sable loameux
100	loam sableux
150	loam sableux très fin; argile
200	loam limoneux; argile sableuse; loam argileux
250	loam limono-argileux; argile sableuse; argile limoneuse; argile; argile lourde.

variaient relativement peu en fonction de K_y et de la capacité de rétention d'eau disponible et n'ont donc pas pu être améliorées en corrigeant ces paramètres. C'est pourquoi il a fallu avoir recours à une autre méthode pour calculer le SH.

La méthode retenue est celle de McBride et Brown (1984), dans laquelle le SH dépend d'un paramètre désigné comme le déficit-surplus hydrique du sol (DSHS). On le calcule de la manière suivante :

$$DSHS = P + \theta_i - ETP \qquad (11)$$

où P désigne les précipitations totales au cours de la période de croissance;
θ_i désigne la teneur en eau du sol assimilable par la plante au début de la période de croissance;
et ETP désigne l'évapotranspiration potentielle totale au cours de la période de croissance.

McBride et Brown (1984) ont corrigé le rapport entre le SH et le DSHS à partir de données annuelles sur les rendements des plantes fourragères, recueillies au cours d'essais sur les rendements de variétés réalisés en Ontario. Toutefois, les conditions étant beaucoup plus sèches dans les prairies, on a dû recorriger la courbe du SH vs le DSHS en traçant la courbe des valeurs réelles de SH vs le DSHS pour tous les sites expérimentaux où on avait recueilli des données sur les rendements de luzerne et de fléole. On a tracé une courbe manuelle des valeurs de SH les plus élevées (en supposant que les valeurs plus faibles étaient attribuables à une gestion imparfaite ou à une faible persistance de la parcelle). Les valeurs réelles du SH ont été calculées de la manière suivante :

$$SH = \frac{B_a}{B_y} \qquad (12)$$

où B_a représente la moyenne des rendements en matière sèche observés au cours de toutes les années ayant fait l'objet d'essais régionaux de rendements sur les variétés.

B_y représente le rendement potentiel net en matière sèche (sans facteur limitant) estimé selon le modèle FORYLD.

Le rapport entre le SH et le DSHS utilisé dans le modèle FORYLD est illustré à la figure 5. On le représente mathématiquement à l'aide de l'équation polynomiale cubique suivante :

$$SH = 0{,}594 + 2{,}426\ DSHS - 1{,}423(DSHS)^2 - 7{,}905(DSHS)^3 \qquad (13)$$

où DSHS est en mètres. Cette valeur estimée du SH a par la suite été utilisée dans les calculs du rendement prévu en matière sèche (B_{ya}).

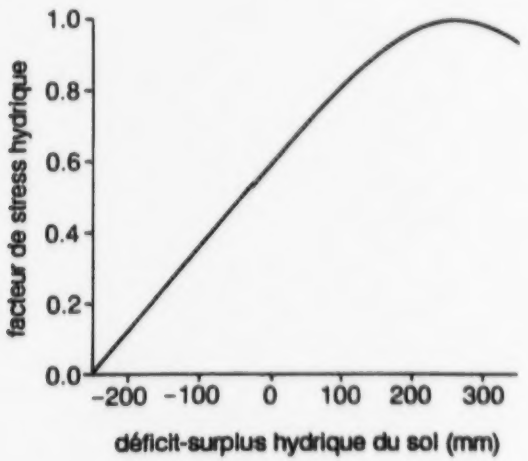

Figure 5. Rapport entre le facteur de stress hydrique (SH) et le déficit-surplus hydrique du sol (DSHS).

Conformément aux conclusions de McBride et Brown (1984), il s'est averé que cette relation était également valable pour la luzerne et la fléole, et qu'elle s'appliquait à toutes les coupes.

2.5.2 Validation des rendements prévus (sol non irrigué) en matière sèche (B_{ya})

a) Validation des rendements de luzerne et de fléole

Les estimations du modèle ont été comparées aux rendements moyens observés à des endroits choisis au Canada où l'on a pratiqué jusqu'à trois coupes de luzerne (tableau 7) et deux coupes de fléole (tableau 8), afin de vérifier le mieux possible les estimations de rendements prévus en matière sèche fournies par le modèle FORYLD. Les rendements moyens observés ont été calculés en établissant la moyenne des rendements annuels observés au cours d'essais sur les variétés fourragères réalisés dans diverses régions au Canada (ex. : Ontario Forage Crops Committee, 1968; Comité de l'Atlantique sur les cultures, 1982; Comité d'experts sur les plantes fourragères, 1983). Seuls les rendements basés sur les données recueillies au cours des premières années suivant celle de l'établissement ont été utilisées pour le calcul des moyennes. On a ainsi minimisé les effets reliés à la réduction de la persistance de la parcelle et aux dommages hivernaux. Lorsque les résultats des essais démontraient que les dommages hivernaux étaient importants, on n'a pas tenu compte des rendements en question dans le calcul de la moyenne. La source des données relatives à la capacité de rétention d'eau disponible utilisées pour estimer B_{ya} est mentionnée dans les tableaux. Les valeurs attribuées à la capacité de rétention d'eau disponible ont été estimées soit à partir des classes texturales relatives aux sites expérimentaux, selon les classes figurant au tableau 6, soit à partir des estimations provenant des travaux de McBride et Brown (1984). Le nombre d'années ayant fait l'objet d'essais régionaux de variétés pour lesquels on a utilisé des données dans le calcul des rendements moyens observés est également mentionné dans les tableaux. Pour certaines années, à certains endroits, les données ont été recueillies au cours de plusieurs essais.

Les rendements moyens estimés de luzerne pour l'ensemble des coupes n'ont été que de 0,6 t/ha supérieurs aux rendements moyens observés aux douze sites expérimentaux (tableau 7). La corrélation entre les rendements estimés et observés de luzerne était bonne ($r = 0,91$) pour l'ensemble des coupes à chacun des endroits et le ratio des valeurs était près de 1:1 (figure 6). Pour la fléole des prés, la différence entre le rendement estimé moyen à tous les endroits et les rendements moyens observés était d'au plus 0,3 t/ha pour les deux coupes (tableau 8). A certains endroits, les rendements estimés dépassaient les rendements observés par plus de 1 t/ha (ex. : pour la première coupe de luzerne à Indian Head, Kapuskasing et Truro; pour la première coupe de fléole à Frédéricton, la deuxième coupe à Kapuskasing, Kemptville et Truro).

Tableau 7. Comparaison entre les rendements moyens prévus (sol non irrigué) - observés et estimés - en matière sèche (B_{ya}). Luzerne.

Endroit	Cap. rét. d'eau disp.	Rend. moy. obs. (t/ha) # d'années-essais*				Rend.est.(t/ha)			
		C.1	C.2	C.3	T	C.1	C.2	C.3	T
Lacombe, Alb.	200	4,0/20	2,8/20	-	6.8	5,3	3,4	-	8,7
Indian Head, Sask.	250	3,0/26	2,4/7	-	5,4	4,9	2,9	-	7,8
Swift Current, Sask.	150	2,3/37	1,5/18	-	3,8	2,1	1,4	-	3,5
Brandon, Man.	200	3,9/22	2,3/22	-	6,2	4,8	2,8	-	7,0
Guelph, Ont.	130†	4,9/37	3,2/35	2,7/29	10,8	5,9	2,4	2,4	10,6
Kapuskasing, Ont.	50†	3,4/27	2,4/27	-	5,8	4,7	2,8	-	7,5
Kemptville, Ont.	100†	5,1/24	2,4/20	2,5/18	10,0	5,0	2,1	2,2	9,3
New Liskeard, Ont.	70†	4,7/22	2,9/20	-	7,6	4,5	2,8	-	7,2
Ottawa, Ont.	130†	4,9/26	2,8/26	2,3/25	10,0	5,5	2,5	2,4	10,3
Ridgetown, Ont.	200	6,0/47	3,9/47	3,0/25	12,9	6,8	3,1	2,7	12,7
Truro, N.-É.	100	4,2/12	2,9/12	-	7,1	6,0	3,2	-	9,3
Charlottetown, I.-P.-É.	150	6,0/20	3,2/20	-	9,2	6,2	3,3	-	9,5
Moyenne		4,4	2,7	2,6	8,0	5,1	2,7	2,4	8,6

† Valeurs de capacité de rétention d'eau disponible du sol tirées des travaux de McBride et Brown (1984); les autres valeurs sont estimées à partir des classes texturales (voir tableau 6).

* Les données peuvent inclure plus d'un essai par saison à chaque endroit.

Tableau 8. Comparaison entre les rendements moyens prévus (sol non irrigué) - observés et estimés - en matière sèche (B_{ya}). Fléole des prés.

Endroit	Cap. rét. d'eau	Rend. moy. obs. (t/ha)/# d'années-essais*			Rend.est. (t/ha)		
		Coupe 1	Coupe 2	Total	Coupe 1	Coupe 2	Total
Guelph, Ont.	130†	7,4/28	2,3/24	9,7	6,4	2,7	9,1
Kapuskasing, Ont.	50†	4,4/32	2,5/30	6,9	5,0	3,7	8,8
Kemptville, Ont.	100†	6,0/14	3,6/8	9,6	5,4	2,1	7,5
Ottawa, Ont.	130†	5,2/53	2,3/33	7,5	5,9	2,5	8,5
Ridgetown, Ont.	200	6,6/14	2,9/13	9,5	7,5	2,7	10,2
Frédericton, N.-B.	100	5,2/53	2,3/33	7,5	6,2	2,9	9,1
Truro, N.-É.	100	6,4/15	2,4/12	8,8	6,6	3,6	10,3
Charlottetown, I.-P.-É.	150	7,0/20	3,1/19	10,0	7,0	3,4	10,4
Moyenne		6,0	2,7	8,7	6,3	3,0	9,2

† Valeurs de capacité de rétention d'eau disponible du sol tirées des travaux de McBride et Brown (1984); les autres valeurs sont estimées à partir des classes texturales (voir tableau 6).

* Les données peuvent inclure plus d'un essai par saison à chaque endroit.

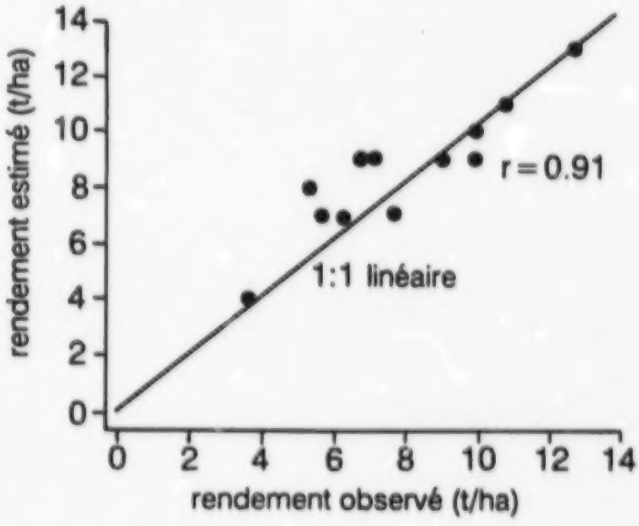

Figure 6. Comparaison entre les rendements prévus moyens en matière sèche - estimés et observés - de toutes les coupes de luzerne (deux - trois coupes).

Plusieurs raisons peuvent justifier certaines différences importantes entre les rendements estimés et les rendements observés : (i) la capacité de rétention d'eau disponible du sol n'est qu'une approximation; dans de nombreux cas, les rendements estimés correspondraient aux valeurs observées si la capacité de rétention d'eau disponible était réduite d'une classe (50 mm) ou moins; (ii) les conditions climatiques au cours des saisons d'essais peuvent être différentes de la normale, surtout lorsqu'il y a relativement peu de saisons en cause; et (iii) les rendements observés peuvent être influencés par le type de gestion, la persistance de la parcelle, la rusticité et les différences variétales. Bien que ces essais ne constituent pas une vérification rigoureuse du modèle, ils démontrent que le modèle FORYLD fournit des estimations valables relativement aux rendements de luzerne et de fléole en sol non irrigué. Sans avoir effectué de comparaisons particulières avec les rendements de brome, il est probable que les rendements et les calendriers de coupe soient semblables à ceux de la fléole.

b) Validation des rendements d'agropyre

Les rendements observés d'agropyre à crête et d'agropyre intermédiaire proviennent de rapports d'essais régionaux réalisés dans l'Ouest du Canada, à partir desquels on a aussi calculé les moyennes (Comité d'experts sur les plantes fourragères, 1983). On n'a utilisé que les données relatives aux trois premières années suivant celle de l'établissement. Les comparaisons entre les rendements observés de graminées et les rendements estimés selon le modèle FORYLD sont présentées au tableau 9 (agropyre à crête) et au tableau 10 (agropyre intermédiaire).

Pour estimer les rendements, on attribue une valeur de 200 mm à la capacité de rétention d'eau disponible du sol à moins d'avoir accès à des données sur la texture du sol. Dans ce dernier cas, on a eu recours au tableau 6 pour déterminer la valeur de la capacité de rétention d'eau. A tous les endroits, les rendements moyens estimés variaient d'au plus 0,1 t/ha des rendements observés d'agropyre à crête et d'agropyre intermédiaire. Toutefois, les différences entre les rendements observés et les rendements estimés à des endroits précis étaient souvent de 0,5 t/ha ou plus. Ces différences sont prévisibles étant donné que les valeurs attribuées à la capacité de rétention d'eau disponible sont très approximatives et que les rendements observés sont fréquemment basés sur des données recueillies au cours de peu de saisons d'essais. Comme pour la luzerne et la fléole, les estimations de rendement coincideraient la plupart du temps avec les valeurs observées si on réduisait d'une classe (50 mm) ou moins la capacité de rétention d'eau disponible. Bien que ces résultats ne constituent pas une vérification rigoureuse du modèle, ils démontrent que le volet traitant des graminées dans le modèle FORYLD fournit une estimation valable des rendements prévus en matière sèche pour l'agropyre à crête et l'agropyre intermédiaire.

3. RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

Le modèle modifié de la FAO a été utilisé avec succès pour estimer les rendements potentiels et prévus en matière sèche de luzerne et de plusieurs espèces de graminées cultivées au Canada. Le modèle ne permet pas de particulariser les différentes espèces de graminées, c'est-à-dire que les estimations fournies portent sur les rendements de l'espèce la mieux adaptée à la région, qu'il s'agisse de fléole des prés, de brome ou d'agropyre à crête ou intermédiaire. On a par ailleurs élaboré des sous-programmes permettant d'estimer les périodes de croissance et les calendriers de coupe relatifs à la luzerne et aux graminées, étant donné que ces aspects sont déterminants dans le cadre du modèle; les rendements sont souvent fortement dépendants du nombre de coupes qui peuvent être effectuées. On a de plus modifié le modèle de la FAO en : (i) corrigeant la courbe illustrant le rapport entre le rendement photosynthétique maximum et la température, (ii) changeant la méthode utilisée pour calculer le LAI et iii) en modifiant la méthode utilisée pour déterminer le facteur de stress hydrique lequel permet de dériver les rendements prévus à partir des rendements potentiels (sans facteur limitant).

Il est impossible de vérifier avec précision un modèle comme le FORYLD qui permet de calculer les rendements moyens à partir de normales climatiques, car il est difficile de recueillir à long terme des données sur les rendements observés qui proviennent de divers endroits. Néanmoins, les vérifications présentées ici démontrent que les estimations fournies par le modèle diffèrent de plus ou moins 1 t/ha des valeurs observées; à certains endroits, cette différence peut cependant être de plus ou moins 2 t/ha. Les différences plus importantes qui existent entre les estimations de rendement fournies par le modèle et les rendements moyens observés en champ, à certains endroits, sont probablement dues à des variations dans la gestion, dans la persistance de la parcelle ou aux dommages hivernaux. On n'a pas tenu compte de ces paramètres dans le présent modèle.

Tableau 9. Comparaison entre les rendements moyens prévus (sol non irrigué) - observés et estimés - en matière sèche (B_{ya}). Agropyre à crête.

Endroit	C.rét. d'eau	Coupe N°	Années/ essais	Rend. MS t/ha Obs.††	Est.
Lacombe, Alb.	200*	1	3	5,8	5,9
Indian Head, Sask.	200*	1	4	5,3	4,6
Melfort, Sask.	200	1	3	4,9	4,7
Melfort, Sask.	200	2	3	2,4	2,9
Saskatoon, Sask.	200	1	14	4,5	3,7
Swift Current, Sask.	250*	1	6	2.1	2,8
St-Claude, Man.	200	1	3	6.1	5,9
St-Claude, Man.	200	2	3	2.0	2.5
Moyenne				4,1	4,1

† Les relevés climatiques provenant de Derwood, Man., ont été utilisés pour l'estimation des rendements.

†† La moyenne peut avoir été calculée à partir de résultats provenant de plus d'un essai au cours d'une même saison.

* La capacité de rétention d'eau disponible est basée sur les classes texturales; toutes les autres valeurs sont hypothétiques.

Tableau 10. Comparaison entre les rendements moyens prévus (sol non irrigué) - observés et estimés - en matière sèche (B_{ya}). Agropyre intermédiaire.

Endroit	C.rét. d'eau	Coupe N°	Années/ essais	Rend. MS t/ha Obs.††	Est.
Beaverlodge, Alb.	200	1	8	5,1	6,0
Beaverlodge, Alb.	200	2	6	2,1	3,8
Lacombe, Alb.	200*	1	4	6,3	5,9
Lacombe, Alb.	200*	2	4	3,8	3,7
Lethbridge, Alb.	200	1	8	4,3	4,3
Lethbridge, Alb.	200	2	2	2,3	1,5
Indian Head, Sask.	200*	1	12	4,4	4,6
Melfort, Sask.	200	1	6	5,5	4,7
Saskatoon, Sask.	250*	1	9	4,2	3,7
Swift Current, Sask.	200*	1	11	2,4	2,8
Swift Current, Sask.	200*	2	4	0,5	1,2
Moyenne				3,7	3,8

†† La moyenne peut avoir été calculée à partir de résultats provenant de plus d'un essai au cours d'une même saison.

* La capacité de rétention d'eau disponible est basée sur les classes texturales; toutes les autres valeurs sont hypothétiques.

Les estimations de rendement fournies par le modèle FORYLD, lorsque ce dernier est utilisé avec les données climatiques appropriées dans un contexte géographique, devraient constituer une source utile d'informations pour des études sur l'évaluation des terres. Les rendements estimés représentent des niveaux de production qui peuvent être atteints en sol irrigué (rendement potentiel) et en sol non irrigué (rendement prévu) au cours des premières années suivant l'établissement, sous des conditions de gestion idéales et sans perte associée à l'hiver.

Au cours des dernières années, on s'est de plus en plus penché sur la détermination des risques associés à la production des cultures en termes de variations de rendements au cours des années, dans le contexte de l'évaluation des terres (Dumanski et Kirkwood, 1988). Toutefois, étant donné que le modèle FORYLD ne permet pas d'estimer les rendements sur une base annuelle, il ne fournit pas non plus l'évaluation du facteur de risque associé à la production de plantes fourragères. D'autres travaux relatifs aux méthodes de modélisation sont en cours et ils permettront d'estimer les rendements des plantes fourragères sur une base annuelle, intégrant ainsi le facteur de risque. Entre-temps, les estimations fournies par le modèle FORYLD offriront une source d'informations permettant de faciliter l'évaluation des terres en ce qui a trait à la possibilité d'y cultiver des plantes fourragères ainsi que l'évaluation des effets potentiels de l'irrigation sur les rendements. Ce modèle pourra également faciliter l'évaluation des conséquences éventuelles de diverses possibilités de changements climatiques sur les rendements des plantes fourragères au Canada.

4. BIBLIOGRAPHIE

Allard, H.A.; Evans, M.W. 1941. Growth and flowering of some tame and wild grasses in response to different photoperiods. J. Agric. Res. 62:193-228.

Bootsma, A. 1984. Forage crop maturity zonation in the Atlantic region using growing degree-days. Can J. Plant Sci. 64:329-338.

Bootsma, A.; Suzuki, M. 1985. Critical autumn harvest period for alfalfa in the Atlantic region based on growing degree-days. Can. J. Plant Sci. 65:573-580.

Carter, P.R.; Sheaffer, C.C. 1983. Alfalfa response to soil water deficits. I. Growth, forage quality, yield, water use, and water-use efficiency. Crop Science. 23: 669-675.

Chapman, L.J.; Brown, D.M. 1966. Les climats du Canada et l'agriculture. Rapport sur l'inventaire des terres du Canada n° 3, Édition révisée 1978, Environnement Canada, Direction générale de la recherche, Ottawa. 24 p.

Clayton, J.S.; Ehrlich, W.A.; Cann, D.B.; Day, J.H.; Marshall, I.B. 1977. Soils of Canada, Vol. 1 et 2. Direction de la recherche, Agriculture Canada, Ottawa. 239 p.

Comité de l'Atlantique sur les cultures. 1982. Forage evaluators reports. Distribué par : Département de phytologie, Collège d'agriculture de la Nouvelle-Écosse, Truro, N.-É. 60 p.

Comité d'experts sur les plantes fourragères. 1983. Uniform variety tests of forage crops, contributed by research workers in western Canada (1983). Publié par Agriculture Canada, Direction générale de la recherche. 170p.

DeJong, R.; Shields, J.A. 1988. Available water-holding capacity maps of Alberta, Saskatchewan and Manitoba. Can. J. Soil Sci. 68:157-163.

DeRuiter, J.M.; Taylor, A.O. 1979. Annual cool-season legumes for forage III. Effects of temperature photoperiod and vernalisation on flowering. N.Z. J. Exp. Agric. 7:153-156.

DeWit, C.T. 1965. Photosynthesis of leaf canopies. Agric. Res. Rep. 663. Centre Agric. Public. Docum., Wageningen. 57 p.

Doorenbos, J.; Kassam, A.H. 1979. Yield response to water. F.A.O. Irrigation and Drainage Paper 33, FAO, Rome. 193 p.

Dumanski, J.; Stewart, R.B. 1983. Crop production potentials for land evaluation in Canada. Agriculture Canada, Direction générale de la recherche, Institut de recherche sur les terres. Publication 1983-13E. 80 p.

Dumanski, J.; Kirkwood, V. 1988. Crop production risks in the Canadian prairie region in relation to climate and land resources. Agriculture Canada, Direction générale de la recherche, Bulletin technique 1988-5E. 144 p.

Evans, M.W.; Allard, H.A. 1934. Relation of length of day to the growth of timothy. J. Agric. Res. 48:571-586.

Evans, M.W.; Wilsie, C.P. 1946. Flowering of bromegrass, Bromus inermis, in the greenhouse as influenced by length of day, temperature, and level of fertility. J. Amer. Soc. Agron. 38:923-932.

FAO. 1978. Report on the Agro-ecological zones project, Vol. 1. Methodology and results for Africa. World Soil Resources Report 48, FAO, Rome. 158 p.

Fulkerson, R.S. 1970. Location and fall harvest effects in Ontario on food reserve storage in alfalfa (Medicago sativa L.). Dans : Proc. XI Int, Grassland Congress, Univ. of Queensland Press, Queensland, Australia. pp. 555-559.

Gasser, H.; Lachance, L. 1969. Effect of dates of cutting on dry matter production and chemical content of alfalfa and birdsfoot trefoil. Can. J. Plant Sci. 49:339-349.

Harcourt, D.G. 1984. Unités thermiques pour la luzerne - sud de l'Ontario. Agriculture Canada, Ottawa, Canadex 121.10. 2 p.

Hunt, L.A.; Moore, C.E.; Winch, J.E. 1970. Light attenuation coefficient and productivity in Vernal alfalfa. Can. J. Plant Sci. 50:469-474.

Irvine, R.B.; McElgunn, J.D. 1982. Effects of eight three-cut harvesting schedules on production of alfalfa forage under irrigation in southwestern Saskatchewan. Can. J. Plant Sc. 62:107-110.

Kilcher, M.R.; Heinrichs, D.H. 1974. Interpretive difficulties with erratic data from perennial forage crops grown in a semiarid region. Can J. Plant Sci. 54:457-462.

Kirkwood, V.; Dumanski, J.; Bootsma, A.; Stewart, R.B.; Muma, R. 1989. The land potential data base for Canada, User's handbook. Direction générale de la recherche, Agriculture Canada. Bulletin technique 1983-4E. 53 p.

Ludwig, R.A.; Barrales, H.G.; Steppler, H. 1953. Studies on the effect of light on the growth and development of red clover. Can. J. Agric. Sci. 33:274-287.

Lutwick, L.E.; Smith, A.D. 1977. Yield and composition of alfalfa and crested wheatgrass, grown singly and in mixture, as affected by N and P fertilizers. Can J. Plant Sci. 57:1077-1083.

McBride, R.A.; Brown, D.M. 1984. A study of crop modelling alternative for the hay and pasture insurance plan in Ontario. Rapport préparé pour le compte de la Commission de l'assurance-récolte de l'Ontario, Toronto. Vol. 1 et 2. 166 p.

Ontario Forage Crops Committee. 1968. Forage Crops Investigations - Ontario. Report on Field Trials of Varieties and Mixtures. Rapport non publié.

Pêches et Environnement Canada. 1978. Atlas hydrologique du Canada. Carte 10: Dates d'apparition et de disparition de la couverture neigeuse. Approvisionnements et Services Canada, Ottawa, Ont., n° de catalogue En 37-26/1978.

Stewart, R.B. 1983. Modelling methodology for assessing crop production potentials in Canada. Agriculture Canada, Direction générale de la recherche, Publication 1983-12E, Ottawa, Ontario. 29 p.

Stout, D.G. 1986. The critical fall harvest period for alfalfa in interior British Columbia. Can J. Plant Sci. 66:565-578.

Woolley, D.G.; Wilsie, C.P. 1961. Cold unit accumulation and cold hardiness of alfalfa. Crop Sci. 1:165-167.

5. ANNEXE

Annexe 1. Dates moyennes de coupe observées et estimées, utilisées pour vérifier les critères relatifs aux dates de coupe.

A. 1re COUPE - LUZERNE

Endroit	Dates de coupe Est.	Obs.†	Années d'essais	Source des données††
C.-B.				
Creston	18 juin	17 juin	3	a
Kamloops	5 juin	12 juin[i]	7	a
Kamloops	5 juin	8 juin	5	c1
ALBERTA				
Beaverlodge	10 juil	9 juil	8	a
Calgary	9 juil	11 juil[d1]	3	b
Calgary-Turner Valley	16 juil[q]	18 juil[d]	9	b
Calgary-Gleichen	5 juil[q]	2 juil[d]	4b	
Claresholm	2 juil	2 juil[d]	8	b
Edmonton	4 juil	23 juin	2	a
Edmonton	4 juil	6 juil[h]	3	b
Edmonton-Rochester	5 juil[q]	5 juil[h]	4	b
Fort Vermilion	3 juil	5 juil	5	a
Lacombe	6 juil	5 juil	8	a
Lethbridge[i]	28 juin	28 juin	4	a
Lethbridge	28 juin	26 juin[h]	4	b
Olds	10 juil	14 juil	14	b
Pekisko-Turner Valley	21 juil	27 juil		
Pincher Creek	10 juil	15 juil[e]	3	c2
Turner Valley	23 juil	18 juil[d]	9	b
Vulcan[i]	3 juil	4 juil[d]	5	b
SASKATCHEWAN				
Choiceland	2 juil	3 juil	2	a
Indian Head	29 juin	29 juin[f]	2	a
Melfort	1 juil	1 juil	4	a
SASK. (suite)				
Saskatoon	27 juin	4 juil[i]	2	a
Saskatoon	27 juin	26 juin	2	a
Swift Current	29 juin	26 juin[i]	11	a
Swift Current	29 juin	24 juin[i]	8	c3
Swift Current	29 juin	27 juin	8	a
MANITOBA				
Brandon	26 juin	25 juin	2	a
Winnipeg	25 juin	19 juin	2	a
ONTARIO				
Elora	25 juin	16 juin[j]	3	a
Guelph	22 juin	19 juin	7	a
Kapuskasing	10 juil	14 juil	7	a
Kemptville	19 juin	17 juin	7	a
New Liskeard	2 juil	1 juil	5	a
Ottawa	18 juin	22 juin	6	a
Ridgetown	14 juin	18 juin	10	a
Thunder Bay	9 juil	6 juil	4	a
QUÉBEC				
Lennoxville	24 juin	25 juin	2	c4
PROV. DE L'ATLANTIQUE				
Charlottetown	6 juil	2 juil	9	a
Frédéricton	29 juin	27 juin	6	a
Nappan	6 juil	1 juil[h]	7	a
St-Jean Ouest	27 juil	19 juil	9	a
Truro	5 juil[p]	26 juin	14	a

Annexe 1. (suite)

B. 2e COUPE - LUZERNE

Endroit	Dates de coupe Est.	Obs.†	Années d'essais	Source des données††
C.-B.				
Creston	21 juil	2 août	3	a
Kamloops	13 juil	21 juil[gi]	2	a
ALBERTA				
Edmonton	17 août	11 août	3	a
Fort Vermilion	12 août	15 août	5	a
Lethbridge	11 août	6 août[i]	10	a
Lethbridge	11 août	14 août[hi]	2	b
Vulcan	16 août	20 août[hi]	4	b
SASKATCHEWAN				
Choiceland	15 août	17 août	2	a
Indian Head	12 août	13 août	2	a
Melfort	14 août	15 août	4	a
Tisdale	14 août[k]	18 août	2	a
Saskatoon	10 août	8 août	4	a
Swift Current	12 août	14 août	11	a
Swift Current	12 août	12 août[i]	3	a
MANITOBA				
Brandon	9 août	3 août	2	a
Winnipeg	8 août	29 juil	2	a
ONTARIO				
Elora	27 juil[i]	17 juil	3	a
Guelph	26 juil	21 juil	5	a
Kemptville	23 juil	19 juil	5	a
New Liskeard	15 août	22 août	3	a
Ottawa	23 juil	30 juil	6	a
Ridgetown	23 juil	22 juil	9	a
Thunder Bay	22 août	13 août	3	a
PROV. DE L'ATLANTIQUE				
Charlottetown	19 août	16 août[h]	9	a
Frédéricton	12 août	17 août[h]	7	a
Nappan	19 août	18 août	9	a
St-Jean Ouest	31 oct	18 oct	4	a
Truro	18 août[p]	12 août[f]	12	a

C. 3e COUPE - LUZERNE

Endroit	Dates de coupe Est.	Obs.†	Années d'essais	Source des données††
B.-C.				
Kamloops	20 août	25 août[gi]	2	a
SASKATCHEWAN				
Swift Current	19 oct	15 oct[i]	4	a
MANITOBA				
Brandon	18 oct	12 oct	2	a
ONTARIO				
Elora	28 août[j]	22 août	3	a
Guelph	29 août	27 août	4	a
Kemptville	26 août	30 août	5	a
Ottawa	27 août	3 sept	4	a
Ridgetown	29 août	2 sept	9	a

D. 4e COUPE - LUZERNE

Endroit	Dates de coupe Est.	Obs.†	Années d'essais	Source des données††
B.-C.				
Kamloops	1 nov	29 oct[i]	2	a

Annexe 1. (suite)

E. 1re COUPE - GRAMINÉES

Endroit	Dates de coupe Est.	Obs.†	Années d'essais	Source des données††
ALBERTA				
Edmonton	4 juil	13 juil	5	b
Edmonton-Rochester	5 juil[q]	12 juil	5	b
Lethbridge	28 juin	7 juil[m]	4	b
Pincher Creek	10 juil	15 juil[em]	3	c2
Swift Current	29 juin	24 juil[dhm]	7	c5
ONTARIO				
Guelph	22 juin	29 juin	12	a
Kapuskasing	10 juil	9 juil	5	a
Kemptville	19 juin	21 juin	5	a
Ottawa	18 juin	25 juin	6	a
Ridgetown	14 juin	21 juin	3	a
Thunder Bay	9 juil	5 juil	4	a
PROV. DE L'ATLANTIQUE				
Charlottetown	6 juil	3 juil	10	a
Fredericton	29 juin	27 juin[h]	12	a
Nappan	6 juil	30 juin	9	a
St-Jean Ouest	27 juil	20 juil	4	a
Truro	5 juil[p]	1 juil[h]	9	a

F. 2e COUPE - GRAMINÉES

Endroit	Dates de coupe Est.	Obs.†	Années d'essais	Source des données††
ONTARIO				
Guelph	16 août	13 août[m]	7	a
Kapuskasing	3 sept	4 sept[m]	5	a
Kemptville	13 août	6 août[m]	5	a
Ottawa	12 août	5 sept	5	a
Ridgetown	8 août	13 août	1	a
Thunder Bay	2 sept	15 août	2	a
PROV. DE L'ATLANTIQUE				
Charlottetown	30 août	2 sept	12	a
Frédéricton	23 août	26 août	15	a
Nappan	30 août	21 août	6	a
Truro	29 août[p]	27 août	10	a

† Les dates moyennes de coupe observées peuvent provenir de plus d'un essai par année.

†† Les données proviennent de l'une des trois sources suivantes : a) essais régionaux sur les rendements de variétés, b) document sur la gestion de rendement SIScan et c) articles scientifiques suivants : c1 Stout, 1986; c2 Lutwick et Smith, 1977; c3 Irvine et McElgunn, 1982; c4 Gasser et Lachance, 1969; c5 Kilcher et Heinrichs, 1974.

d date de coupe établie à partir d'essais en parcelles mixtes.

e la date de coupe observée est une approximation.

f la date observée est établie à partir de régime d'exploitation à 2 coupes seulement; les dates ultérieures peuvent être établie à partir de régime à 1 coupe et les dates antérieures à partir de régime à 3 coupes.

g la date observée est établie à partir de régime à 4 coupes seulement; les dates ultérieures à partir de régime à 3 coupes.

h la date observée a été corrigée en fonction du stade de maturité.

i les données proviennent d'essais réalisés en sol irrigué.

j les normales climatiques pour Fergus Shand Dam, Ontario, ont été utilisées ici.

k les normales climatiques pour Melfort, Saskatchewan, ont été utilisées ici.

m,n les dates de coupe observées des graminées sont respectivement celle du brome et de l'agropyre; toutes les autres sont celles de la fléole.

p l'estimation fournie par le modèle est d'environ quatre jours plus tôt afin de compenser pour les déviations dans les températures normales à la station climatique de Truro, N.-É.

q Les dates sont estimées en fonction des moyennes calculées aux deux stations climatiques les plus près du site d'essai.